

**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Tomáš Fridrišek

Optické hradlování epitaxního grafenu

Fyzikální ústav UK

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Václav Dědič, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Optika a optoelektronika

Praha 2022

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V dne.....

podpis

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce RNDr. Václavu Dědiči, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, pomoci při měřeních a za podnětné připomínky při zpracovávání diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat RNDr. Janu Kuncí, Ph.D. za zaškolení do procesu elektronové litografie a cenné rady týkající se přípravy vzorků. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Mikhailovi Shestopalovu a Mgr. Bohdanovi Morzhukovi za přípravu a charakterizaci mnoha vzorků epixního grafenu, které jsem následně použil během procesu elektronové litografie. Zároveň bych chtěl poděkovat instituci CEITEC Nano, kde mi přístupem do laboratoře byla umožněna příprava vzorků za podpory výzkumné infrastruktury CzechNanoLab (ID LM2018110, MŠMT, 2020–2022), CEITEC Vysoké učení technické v Brně. Nakonec bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za podporu během studia.

Název práce: Optické hradlování epitaxního grafenu

Autor: Bc. Tomáš Fridrišek

Katedra / Ústav: Fyzikální ústav UK

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Václav Dědič, Ph.D., Fyzikální ústav UK

Abstrakt: Karbid křemíku (SiC) je polovodič s širokým zakázaným pásem s vysokou tepelnou, chemickou a mechanickou odolností. Pomocí termální dekompozice křemíku z SiC je možno vyrůst na povrchu vysoce kvalitní epitaxní grafen, jehož výrobu je možné průmyslově škálovat. Tato práce zkoumá, zda je možné opticky hradlovat epitaxní grafen a jaký vliv na elektrickou stabilitu epitaxního grafenu má okolní prostředí. Experimentální část práce se skládá z optimalizace přípravy kontaktů vzorků pomocí elektronové litografie, měření vlivu okolní atmosféry na elektrické vlastnosti grafenu, měření závislosti proudu na optickém výkonu a spektrální závislosti fotovodivosti grafenu. Během měření byl prokázán značný vliv adsorpce molekul z prostředí na elektrické vlastnosti grafenu.

Klíčová slova: epitaxní grafen, SiC, Optické hradlování

Title: Optical gating of epitaxial graphene

Author: Bc. Tomáš Fridrišek

Department: Institute of Physics of Charles University

Supervisor: RNDr. Václav Dědič, Ph.D., Institute of Physics of Charles University

Abstract: Silicon carbide (SiC) is a wide band gap semiconductor with high thermal, chemical and mechanical resistance. By thermal decomposition of silicon from SiC, it is possible to grow high quality epitaxial graphene on the surface. This production can be industrially scaled. This work investigates whether it is possible to optically gate epitaxial graphene and what effect the surrounding environment has on the electrical stability of epitaxial graphene. The experimental part of the work consists of optimizing preparation of the sample contacts using electron beam lithography. Further investigates the influence of surrounding atmosphere on the electrical properties of graphene, measuring the dependence of photocurrent on optical power and spectral dependence of photoconductivity of graphene. The significant effect of adsorption of molecules from the environment on the electrical properties of graphene has been demonstrated.

Keywords: epitaxial graphene, SiC, Optical gating

Obsah

1. Úvod.....	1
1.1. Motivace.....	1
1.2. Karbid křemíku (SiC).....	1
1.2.1. Vlastnosti 6H-SiC.....	2
1.3. Grafen.....	3
1.4. Definice pojmu optického hradlování grafenu.....	3
1.5. Příprava epitaxního grafenu.....	4
1.6. Vliv adsorpce na vodivost grafenu.....	6
2. Uspořádání aparatury a příprava vzorků.....	7
2.1. Příprava vzorků.....	7
2.2. Experimentální uspořádání pro charakterizaci vzorků.....	15
3. Výsledky a diskuse.....	20
3.1. Vliv adsorpce.....	20
3.2. Frekvenční a výkonová závislost.....	28
3.2.1. Hradlování přes spodní kontakt.....	31
3.3. Spektrální závislosti.....	34
3.4. Porovnání a diskuse výsledků.....	41
4. Závěr.....	44
5. Literatura.....	45

1. Úvod

1.1. Motivace

Epitaxní grafen na karbidu křemíku (SiC) je, díky poměrně jednoduché a opakovatelné přípravě a zároveň díky vysoké tepelné, chemické a mechanické odolnosti substrátu, perspektivní materiál pro použití v elektronice a fotonice.

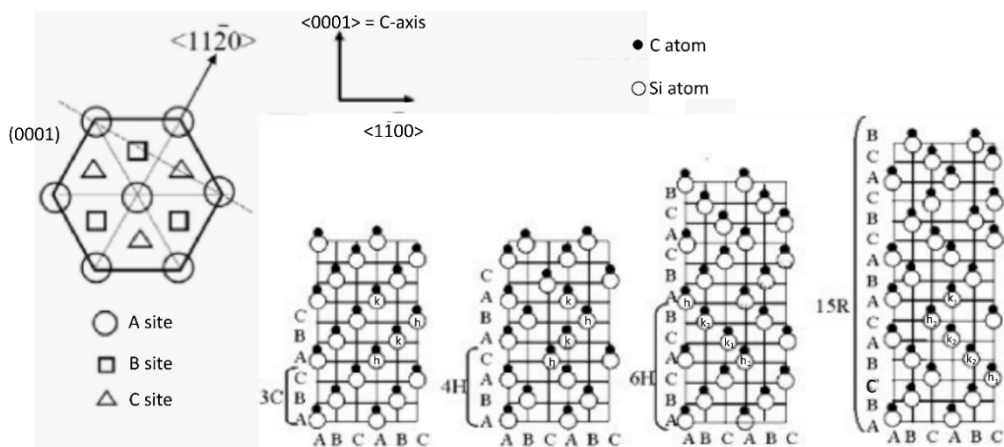
Cílem diplomové práce bylo ověřit možnost optického hradlování epitaxního grafenu na SiC a prověřit možnosti využití epitaxního grafenu v elektronice a fotonice. Zjistit časovou, frekvenční a spektrální závislost a prozkoumat interakci epitaxního grafenu se substrátem, ověřit zda nějaké další vlivy ovlivňují elektrické vlastnosti epitaxního grafenu.

1.2. Karbid křemíku (SiC)

Karbid křemíku byl poprvé synteticky připraven v 19. století. Byl a stále je používán zejména jako brusný a řezací materiál díky vysoké tvrdosti 9,5 v Mohsově stupnici tvrdosti. Pro růst monokrystalů se v současné době nejčastěji využívá metoda PVT (physical vapor transport) [1], provádí se v uzavřeném kelímku nahřátém na velmi vysokou teplotu (přibližně 2200 °C), kdy materiál vlivem sublimace přechází na wafer s nižší teplotou a dochází k růstu monokrystalu.

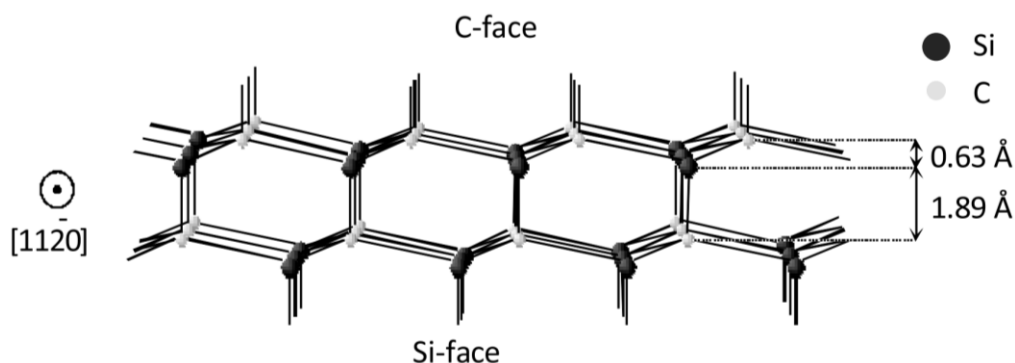
Vazba Si-C je z 88% kovalentní a 12% iontová [1]. Nejmenší stavební jednotkou krystalu je čtyřstěn složený z SiC_4 nebo CSi_4 [1], kde jsou atomy křemíku a uhlíku k sobě vázány pomocí sp^3 orbitalů, každý atom uhlíku je obklopen čtyřmi atomy křemíku a naopak. Vzdálenost dvou stejných atomů je $a = 3,08 \text{ \AA}$, vzdálenost Si-C je $d = 1,89 \text{ \AA}$ s energií vazby $289 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ [1].

Karbid křemíku může krystalizovat v mnoha krystalických strukturách – polytypech, jichž bylo identifikováno přes 200. Nejběžnější jsou 3C, 4H, 6H a 15R, kde C značí kubickou, H hexagonální, R romboedrální mřížku. Jednotlivé polytypy jsou zobrazeny na obr 1.1.



Obr. 1.1: Zobrazení různých polytypů SiC, vlevo tři možné pozice pro skládání dvojevrstev, dále pak sekvence vrstev pro jednotlivé polytypy, převzato z [1].

Některé polytypy SiC, například 4H a 6H, vykazují povrchovou polaritu podél c-osy. Povrchová polarita znamená, že v případě že obě stěny krystalu jsou kolmé na c-osu, pak jedna stěna krystalu bude vždy končit atomy křemíku Si-strana (0001) a opačná strana bude končit vždy atomy uhlíku C-stran (označení $000\bar{1}$), obr. 1.2. Důsledek polarity je rozdíl povrchové energie $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ pro Si-stranu a $0,71 \cdot 10^{-4} \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ pro C-stranu [2]. Povrchová polarita pak může vést k rozdílnému chování materiálu na opačných stranách krystalu, například rozdílné rychlosti oxidace [3], rozdílné rychlosti růstu grafenu a rozdílné výstupní práci grafenu.



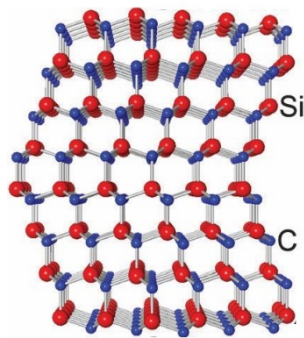
Obr. 1.2: Zobrazení rozdílu mezi Si- a C- stranou krystalu SiC, převzato z [1].

Mezi další vlastnosti SiC patří vysoká chemická odolnost proti všem kyselinám a zásadám při pokojové teplotě. Pro leptání SiC je možno použít alkalické hydroxidy zahřáté na teplotu 400°C . Dále je možno leptat SiC za pokojové teploty pomocí Reactive ion etching (RIE) pomocí směsi SF_6 a O_2 [4]. Další vlastností SiC je vysoká teplotní vodivost $3,5\text{-}5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [1]. Pro srovnání teplotní vodivost hliníku je $2,4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [5]. Vysoká tepelná vodivost SiC vede k redukci složitosti chlazení materiálu a možných struktur připravených na krystalu.

Pro dosažení semiizolačních vlastností SiC lze použít dopování vanadem, který kompenzuje mělké donory a akceptory [6].

1.2.1. Vlastnosti 6H-SiC

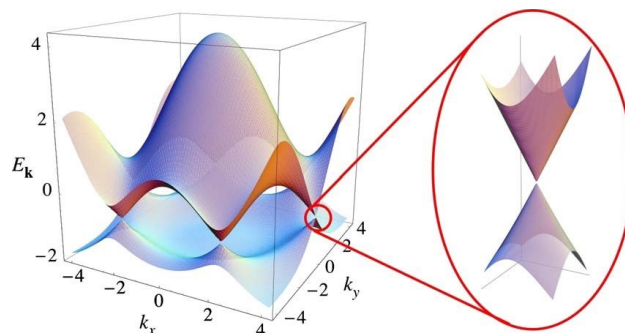
SiC v závislosti na podmínkách růstu krystalizuje v různých krystalových strukturách. Polytyp 6H-SiC (obr. 1.3) krystalizuje v hexagonální mřížce s mřížkovou konstantou $a = 3,08 \text{ Å}$, $c = 15,1151 \text{ Å}$ [7] sekvence vrstev je ABCACB (obr. 1.1). Efektivní hmotnost elektronů je $m_{\parallel e} = 2,0$ a $m_{\perp e} = 0,48$, respektive pro díry $m_{\parallel h} = 1,85$ a $m_{\perp h} = 0,66$ [7]. Symbol \parallel značí efektivní hmotnost paralelní s c-osou, \perp značí kolmou na c-osu. Pohyblivost elektronů při nízkém dopování je $\mu_{\parallel e} = 100 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$, $\mu_{\perp e} = 450 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$, respektive pro díry $\mu_h = 100 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$. Šířka nepřímého zakázaného pásu je $E_B = 3,02 \text{ eV}$ [7], relativní permitivita $\epsilon_r = 9,7$ a index lomu $n = 2,69$ při vlnové délce 600 nm [8]. Díky širokému zakázanému pásu SiC nevykazuje signifikantně zvýšenou koncentraci intrinsických nosičů až přibližně do teploty 800°C [1], a vykazuje tak polovodičové vlastnosti i při vysoké teplotě.



Obr. 1.3: Zobrazení krystalografické mřížky 6H-SiC, převzato z [9].

1.3. Grafen

Grafen je 2D krystal tvořený atomárně tlustou vrstvou uhlíku, která krystalizuje v hexagonální struktuře. Atomy uhlíku jsou v grafenu vázány pomocí sp^2 orbitalů [1]. Šířka zakázaného pásu grafenu je 0. Místo, ve kterém se dotýkají pásy se nazývá Diracův bod, okolí Diracova bodu se nazývá Diracův kužel, viz obr. 1.5. V okolí Diracova bodu mají elektrony lineární disperzní relaci [10].



Obr. 1.4: Pásová struktura grafenu. Zvýrazněná část zobrazuje Diracův kužel, převzato z [10].

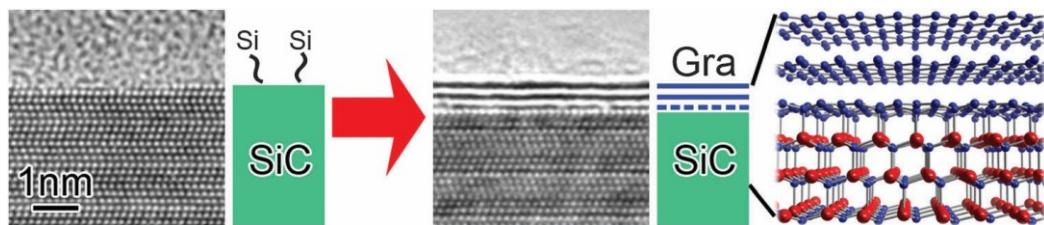
Tři nejznámější metody přípravy epitaxního grafenu jsou mechanická exfoliace, depozice chemických par a termální dekompozice z SiC.

1.4. Definice pojmu optického hradlování grafenu

V případě studia epitaxního grafenu na SiC se lze kromě klasické fotovodivosti, která je popsána přímou úměrou mezi dopadajícím počtem fotonů a fotogenerovanými nosiči, studovat i optické hradlování. U optického hradlování má na fotovodivost vliv, jak počet vynerovaných nosičů v grafenu, tak i interakce grafenu se substrátem, který se může vlivem absorpce světla nabíjet. Vlivem možného nabíjení substrátu, který je v těsné vazbě s epitaxním grafenem, může dojít ke změně dopování epitaxního grafenu a posunu jeho Fermiho meze. Dále může docházet k transportu fotogenerovaného náboje ze substrátu do grafenu a naopak.

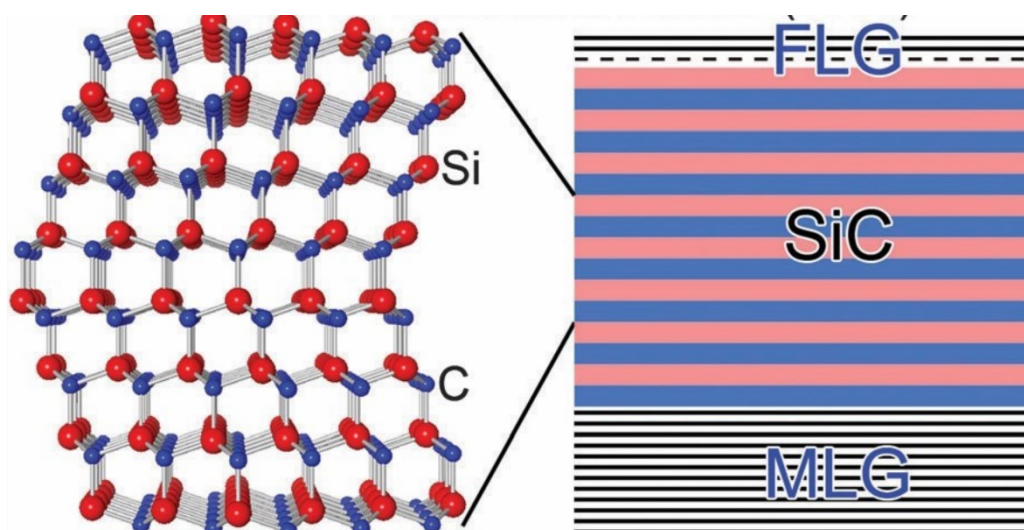
1.5. Příprava epitaxního grafenu

Epitaxní grafen na SiC se připravuje termální dekompozicí křemíku z SiC při teplotách od 1250 °C [11] ve vakuu až k teplotám 2000°C [12] v atmosféře argonu za atmosférického tlaku. Poslední vrstva monokrystalu SiC je zakončena vždy na jedné straně atomy křemíku Si-strana (označení 0001), nebo atomy uhlíku C-strana ($000\bar{1}$). Na obrázku 1.5 je naznačen růst epitaxního grafenu, kdy při vysokých teplotách dochází k selektivní sublimaci atomů křemíku ze substrátu a formaci grafenu. Na obr. 1.5 vpravo je znázorněna dvojvrstva grafenu. Pod touto dvouvrstvou grafenu lze pozorovat ještě jednu vrstvu uhlíku, která je částečně vázaná kovalentními vazbami k substrátu. Tato vrstva se nazývá buffer layer. Při růstu grafenu na Si-straně dochází nejprve k formaci buffer layer a následně dochází k formaci nové buffer layer pod dosavadní, ze které se stává vrstva grafenu.



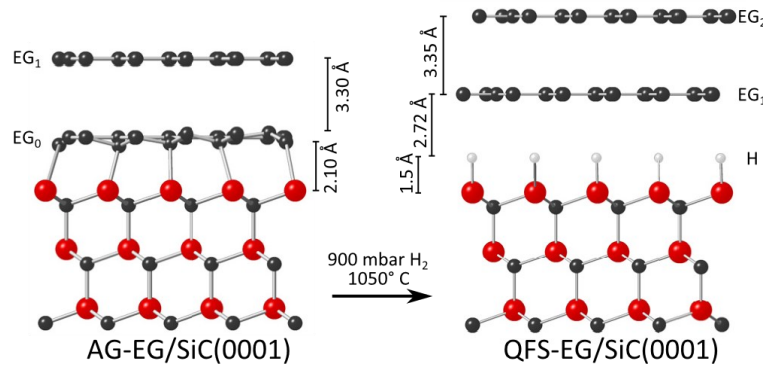
Obr. 1.5: Růst epitaxního grafenu, modře atomy uhlíku, červeně atomy křemíku, převzato z [9].

Na obr. 1.6 je zobrazen rozdíl v růstu mezi Si a C-stranou. Na Si-straně dochází k růstu několikavrstevného grafenu (FLG). V případě správné kontroly parametrů dochází k formaci mono nebo dvojvrstvy. Naopak při stejných parametrech růstu, obvykle dochází na C-straně k formaci multivrstev grafenu (MLG) [9]. Rozdílnost v růstu je způsobena rozdílnou reaktivitou jednotlivých povrchů. Na C-straně oproti Si-straně nevzniká při růstu buffer layer.



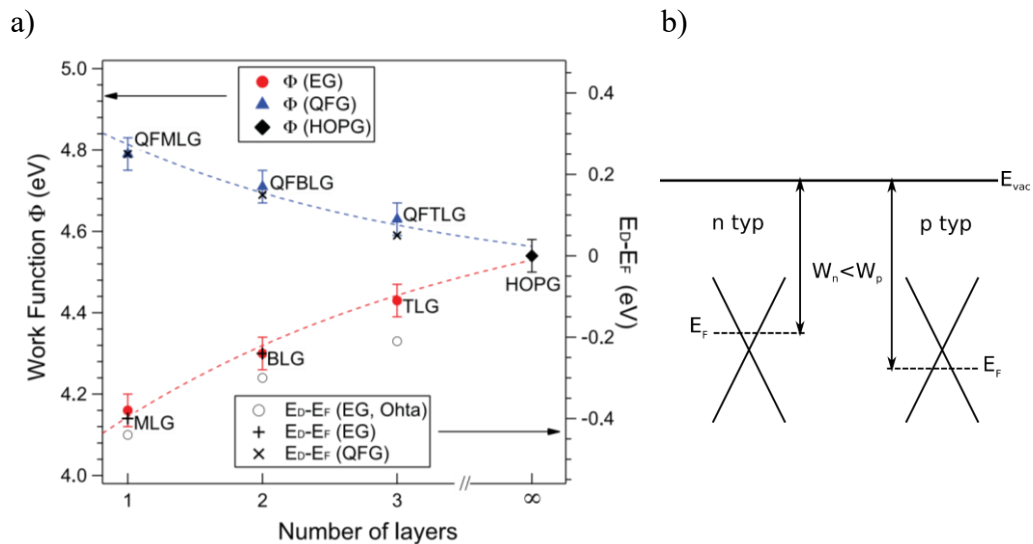
Obr. 1.6: Rozdíl v růstu grafenu mezi Si-stranou SiC na které narostl několikavrstvý grafen (FLG) a C-stranou s multivrstvou grafenu (MLG). Červeně křemík, modře uhlík, přerušovanou čarou je zobrazená buffer layer. Převzato z [9].

Jednou z možností, jak odstranit ze Si-strany buffer layer, je pomocí interkalace grafenu, například v H_2 [13]. Kromě vodíku je možno pro interkalaci použít například lithium [14], sodík [15] a křemík [16]. Princip interkalace je naznačen na obr. 1.7. Při vysoké teplotě (přibližně $1\,000^\circ\text{C}$) [13] dochází k penetraci atomů vodíku přes vrstvu uhlíku a následnému navázání vodíku na atomy křemíku. Navázáním atomů vodíku dojde k přerušení kovalentní vazby mezi buffer layer a křemíkem a z buffer layer se stává vrstva grafenu. Kromě přerušení kovalentní vazby zde dojde k nasycení případných nenasycených vazeb (dangling bonds) vodíkem.



Obr. 1.7: Interkalace grafenu, převzato z [13].

V závislosti na počtu vrstev a přípravě epitaxního grafenu se liší výstupní práce grafenu, obr. 1.8. Výstupní práce grafenu se s rostoucím počtem vrstev přibližuje výstupní práci pyrolytickému grafitu. Obvykle grafen po interkalaci – quasi free standing grafen (QFG) má p-typovou vodivost naopak epitaxní grafen (EG) je n-typ.



Obr. 1.8: a) Závislost výstupní práce grafenu na počtu vrstev, červeně epitaxní grafen, modře quasi free standing grafen, HOPG označuje vysoce orientovaný pyrolytický grafit. Černé symboly označují vzdálenost Dirakova bodu od Fermiho hladiny, převzato z [17] b) Naznačení vlivu výstupní práce na typ vodivosti grafenu.

1.6. Vliv adsorpce na vodivost grafenu

Jelikož epitaxní grafen tvoří poslední vrstvu vzorku a je v kontaktu s okolním prostředím, dochází k adsorpci a desorpci různých molekul, například ze vzduchu. Vlivem adsorpce molekul dochází ke změnám vodivosti grafenu [18-22]. Z běžných molekul vyskytujících se ve vzduchu je vodivost grafenu ovlivněna molekulami H₂O [18-20], CO₂ [21] a O₂ [22]. Například vlivem desorpce molekul z povrchu grafenu ve vakuu po ozáření vzorku UV světlem se zvýšila vodivost epitaxního grafenu na SiC o 110 % [18]. Naopak pro grafen připravený pomocí chemické depozice z plynné fáze se vodivost grafenu po zasnícení snížila.

Adsorpci molekul na povrch lze popsat pomocí Lagergrenova modelu

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q), \quad 1.1$$

kde q je koncentrace adsorbovaných molekul, q_e rovnovážná koncentrace adsorbovaných molekul a k_1 odpovídá rychlosti adsorpce. Po integraci má rovnice 1.1 exponenciální závislost

$$q = q_e - (q_e - q_i)e^{-k_1 \cdot t}, \quad 1.2$$

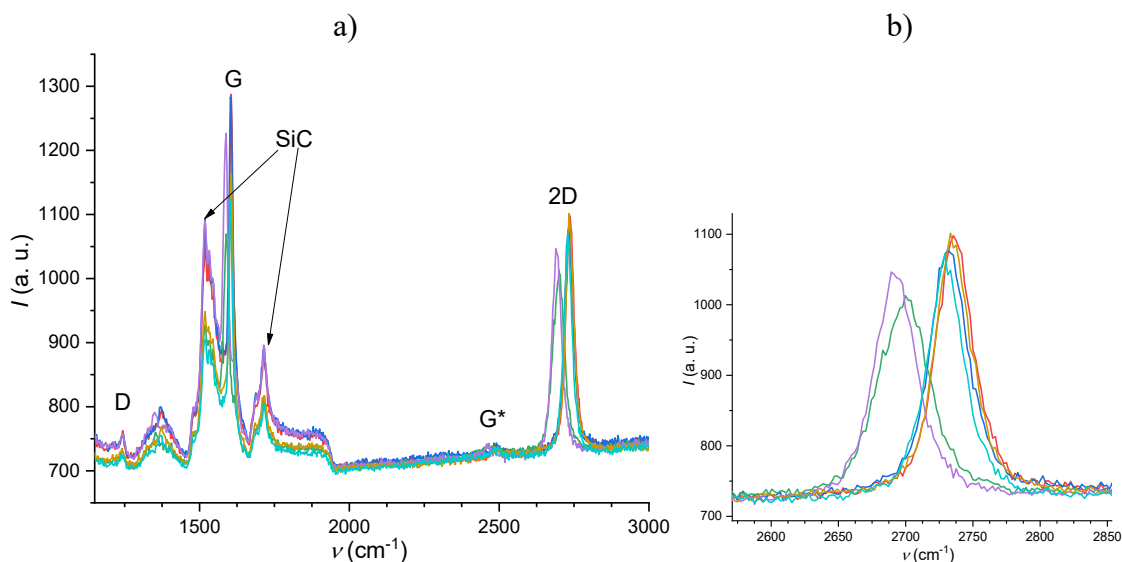
kde q_i je koncentrace adsorbovaných molekul v čase $t=0$. Pak v případě skokové změny rovnovážné koncentrace adsorbovaných molekul q_e má koncentrace q dle rovnice 1.2 exponenciální závislost. Lagergreův model lze použít pouze pro adsorpci molekul jednoho druhu, v případě existence více sloučenin ve směsi může být závislost adsorpce složitější.

2. Uspořádání aparatury a příprava vzorků

2.1. Příprava vzorků

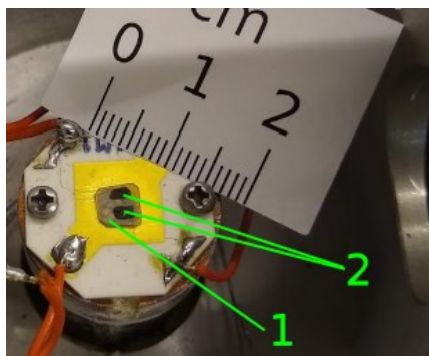
Na přípravu epitaxního grafenu bylo použito semiizolační 6H-SiC. Výrobce substrátu SiC byla firma II-VI Inc. Pro dosažení semiizolačních vlastností bylo výrobcem použito dopování vanadem. Minimální rezistivita udávaná výrobcem je $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$. Deska substrátu o tloušťce 350 μm byla pomocí diamantové tužky rozdělena na čtverce o délce hrany přibližně 5 mm. Před růstem byl vzorek očištěn v acetonu a isopropanolu. Vzorek byl v laboratoři magneto-optických měření Fyzikálního ústavu UK v Troji vložen do indukční pece pro růst epitaxního grafenu pomocí termální dekompozice křemíku. Během růstu byla pec nahřátá na teplotu 1750 °C. Pro dosažení vhodného tlaku a čistoty, peci proudil argon.

Pro charakterizaci kvality grafenu bylo provedeno kontrolní měření Ramanových spekter na konfokálním spektrometru WITEC, viz obr. 2.1. Na grafu je zobrazeno spektrum z několika míst na vzorku D1M26. Na grafu jsou vyznačena jednotlivá maxima odpovídající epitaxnímu grafenu. Jedná se o G a 2D, a dále jsou v grafu vyznačena dvě maxima odpovídající SiC. Nízký D vrchol značí vysokou homogenitu epitaxního grafenu, úzké maximum 2D s šířkou 32 až 35 cm^{-1} indikuje vysokou čistotu grafenu. Na obr. 2.1 b) je vyznačen detail 2D maxima, na kterém si lze všimnout dvou maxim. Posun dvou maxim indikuje, že na části vzorku začala růst druhá vrstva grafenu.



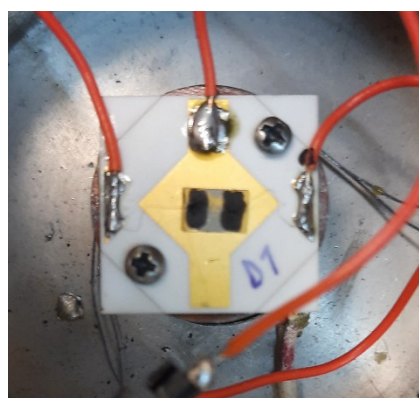
Obr. 2.1: Ramanova spektroskopie grafenu na vzorku D1M26. a) zobrazení Ramanových spekter měřených na několika místech vzorku b) detail 2D vrcholu, s šířkou v polovině maxima 32 až 35 cm^{-1} .

Po růstu grafenu na vzorku D1M1 byly u vzorku obroušeny hrany z důvodu odstranění vodivých uhlíkových struktur vzniklých během růstu grafenu. Horní plocha byla tvořena epitaxním grafenem na Si straně spodní plocha byla tvořena epitaxním grafenem na C-straně. Spodní strana byla pomocí vodivé stříbrné pasty přilepena k destičce a sloužila jako kontakt pro elektrické hradlování (obr. 2.2-1). Kontakty source a drain byly ručně připraveny pomocí grafitové pasty, obr. 2.2-2. Kontakty byly následně pomocí stříbrných drátků spojeny s keramickou destičkou.



Obr. 2.2: Vzorek D1M1 1) spodní celoplošný kontakt 2) kontakty source a drain.

Pro porovnání odezvy substrátu byl vytvořen vzorek s totožnou konfigurací kontaktů jako vzorek D1M1, který byl tvořený pouze substrátem (obr. 2.3). Na vzorku D1 nebyl narosten grafen. Je tvořen pouze vanadem dopovaným semi-izolačním SiC. Vzorky D1M1 a D1 pocházejí ze stejné desky.



Obr. 2.3: Vzorek D1 tvořený pouze substrátem bez grafenu. Vzorek D1 má stejnou konfiguraci kontaktů jako vzorek D1M1.

Vzorky D1M26 a D5M62 obr. 2.7 a), b), byly připraveny pomocí tříkrokové elektronové litografie. Proces litografie je naznačen na obr. 2.4. Celý proces litografie probíhal v laboratoři nanofabrikace v zařízení CEITEC Nano. Po sérii optimalizačních experimentů byl proces litografie proveden následujícím způsobem.

Byla použita 3 kroková litografie (naznačeno na obr. 2.5). Každý krok litografie byl rozdělen do 6 procesů naznačených na obr. 2.4. a-f.

První krok litografie spočíval v napaření kontaktů. Je naznačen na obr. 2.5. První proces litografie je nanesení fotorezistu a) na vzorek. Bylo tak provedeno na

zařízení Lithographic wetbench for coating (SUSS-WETBECH) na spin coateru LabSpin 6. Na vzorek byly nanášeny dvě vrstvy fotorezistu. První vrstva byla tvořena pozitivním fotorezistem AR-P 617.08 [23] s citlivostí $60 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$. Vrstva byla nanášena při 4 000 otáčkách za minutu, tloušťka vrstvy by měla být přibližně 500 nm. Druhá vrstva byla tvořena pozitivním fotorezistem AR-P 679.04 [24] s citlivostí $300 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$. Vrstva byla nanášena opět při 4 000 otáčkách za minutu a tloušťka vrstvy by měla být přibližně 270 nm.

Po nanášení fotorezistu došlo k vypečení fotorezistu b). Fotorezist AR-P 617.08 byl vypečen na teplotě 200°C po dobu 10 minut na HotPlate v rámci systému SUSS-WETBECH. Následně byl fotorezist AR-P 679.04 nanášen a vypečen na teplotu 150°C po dobu tří minut.

Následně za c) probíhá expozice vzorku elektronovým svazkem v elektronovém mikroskopu-litografu, konkrétně Scanning Electron Microscope/E-beam writer TESCAN MIRA3/RAITH LIS. Expoziční dávka byla $330 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$ při urychlovacím napětí 30 kV a proudu 2 nA.

Dalším procesem litografie je d) vyvolání fotorezistu. Pro vyvolání pozitivního fotorezistu byla použita vývojka AR 600-56, jejíž hlavní součástí je Methylisobutylketon (MIBK). Délka vyvolání byla 60 s, jako ustalovač byl použit Isopropanol 30 s, následně byl vzorek po dobu 30 s opláchnut ve vodě.

Následně v části e) proběhlo leptání pomocí reaktivních iontů (RIE) a napařování. Nejprve došlo k leptání pomocí RIE v přístroji PlasmaPro 80 RIE. Leptání bylo provedeno v atmosféře SF_6 po dobu 15 s a následně v atmosféře O_2 po dobu 15 s. Cílem leptání bylo odstranit ze vzorku grafen před napařováním kontaktů. Následně byl vzorek přenesen na napařování do přístroje Electron beam evaporator BESTEC. Na vzorek bylo napařeno 5 nm titanu, 75 nm mědi a 20 nm zlata.

Poslední proces prvního kroku litografie f) spočíval v odstranění zbylého fotorezistu spolu s napařeným kovem, který byl mimo kontakty. Pro odstranění pozitivního fotorezistu po napaření kovů byl použit aceton, do kterého byly vzorky ponořeny na několik hodin. Následně byl povrch vzorku opláchnut acetonem.

Druhý krok litografie, naznačen na obr. 2.5, spočíval v napaření přívodních kanálů k Hall barům a byl podobný prvnímu kroku. Procesy a) a b) probíhaly totožně jako u prvního kroku.

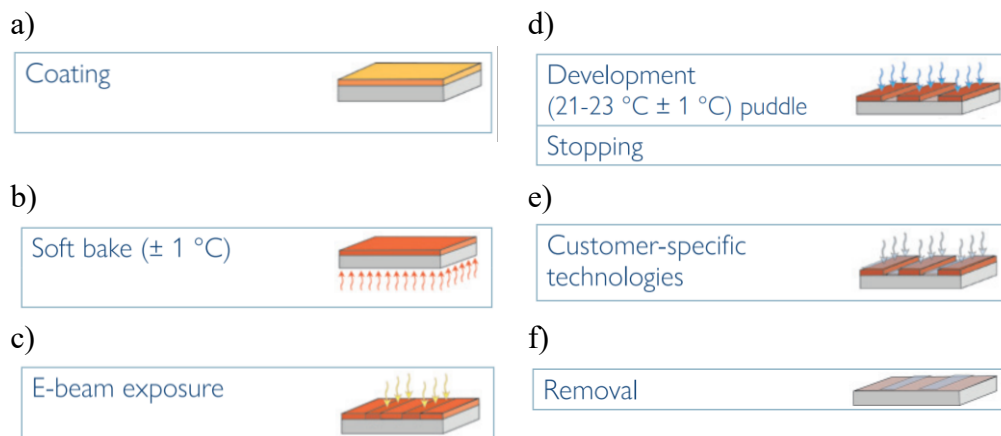
Pro proces c) byl opět použit elektronový mikroskop MIRA3 s urychlovacím napětím 30 kV, s expoziční dávkou $330 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$. Proud ve svazku byl nastaven na 900 pA. Proces d) proběhl totožně jako u prvního kroku litografie.

V procesu e) se grafen již neleptal před napařováním. Proběhlo pouze napařování kovu, opět 5 nm titanu, 75 nm mědi, 20 nm zlata. Proces f) znovu probíhal totožně jako první krok litografie.

Třetí krok litografie spočíval v ochranně Hall barů a následném odleptání grafenu z celého povrchu vzorku. V procesu a) byl na vzorek nanesen negativní fotorezist AR-N 7520.17 [25]. Nanesen byl při 4 000 otáčkách za minutu, tomu odpovídala tloušťka přibližně 400 nm, senzitivita fotorezistu byla $30 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$ [25].

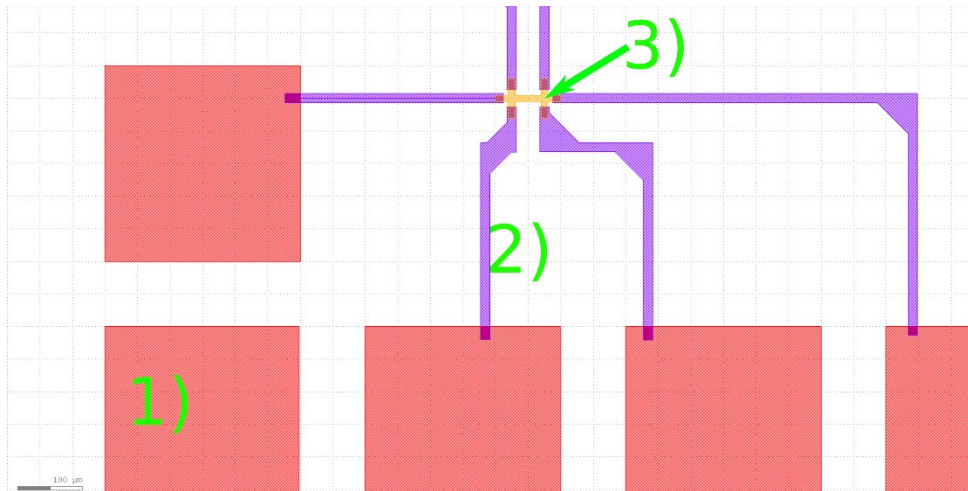
Vypečení fotorezistu b) bylo provedeno na HotPlate při teplotě 85°C po dobu 1 minuty. V procesu c) byl opět použit elektronový mikroskop MIRA3 s urychlovacím napětím 30 kV, expoziční dávka byla nastavena na $35 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$ a proud byl nastaven na 200 pA.

Vyvolávání fotorezistu d) proběhlo ve vývojce AR 300-46 po dobu 120 s. Vzorek byl následně opláchnut po dobu 30 s ve vodě, která sloužila jako ustalovač. Následovalo leptání RIE e), a to konkrétně 30 s v atmosféře SF_6 a 30 s v atmosféře O_2 . Během leptání byl odstraněn grafen z celého povrchu vzorku, kromě místa Hall baru, kde byl chráněn negativním fotorezistem a v místě přívodních kontaktů, vytvořených ve druhém kroku litografie, kde byl grafen chráněn kovem.



Obr. 2.4: Naznačení procesu elektronové litografie. a) nanesení fotorezistu b) vypečení fotorezistu při předepsané teplotě c) ozáření fotorezistu elektronovým svazkem d) vyvolání fotorezistu e) napaření kovu nebo leptání f) odstranění fotorezistu, převzato z [24].

Tříkroková litografie byla zvolena z důvodu špatné adheze kovu na grafenu. Při přípravě jiných vzorků, kde byl spojen první a druhý krok litografie a nebyl odleptán grafen pod kontakty. Nebylo možné nakontaktovat vzorky pomocí drátového kontaktovacího systému kvůli špatné adhezi kovu na grafenu, což se projevovalo odlepením napařeného kovu spolu s drátkem z grafenu při kontaktování. Jednotlivé kroky litografie jsou naznačeny na obr. 2.5.

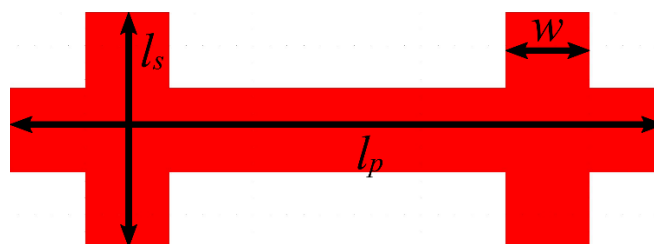


Obr. 2.5: Části vzorku vytvořených v jednotlivých krocích litografie. 1) vyleptání grafenu pod kontakty a napaření kontaktů, 2) Napaření přívodních kontaktů k Hall barům 3) Zakrytí Hall baru pomocí negativního fotorezistu a následné vyleptání okolního grafenu.

Po dokončené litografii byly pořízeny snímky vzorků obr. 2.8, 2.9 pomocí elektronového skenovacího mikroskopu TESCAN LYRA3. Na každém vzorku byly připraveny čtyři Hall bary různých velikostí. Rozměry jednotlivých Hall barů jsou uvedeny v tabulce 2.1.

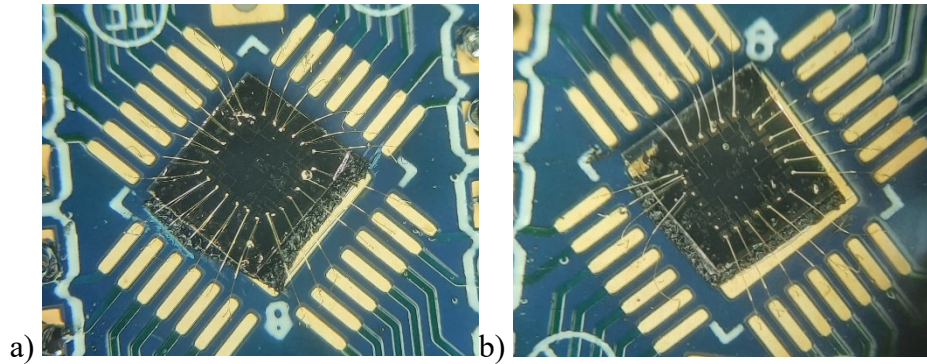
	a)	b)	c)	d)
l_p (μm)	78	400	33	18
l_s (μm)	28	100	13	7
w (μm)	10	40	5	2

Tabulka 2.1: Rozměry Hall barů. l_p podélná vzdálenost kontaktů, l_s příčná vzdálenost kontaktů, w šířka vodivého grafenového kanálu (obr. 2.6). Písmena a, b, c, d odpovídají jednotlivým Hall barům uvedených na obrázcích 2.8, 2.9.

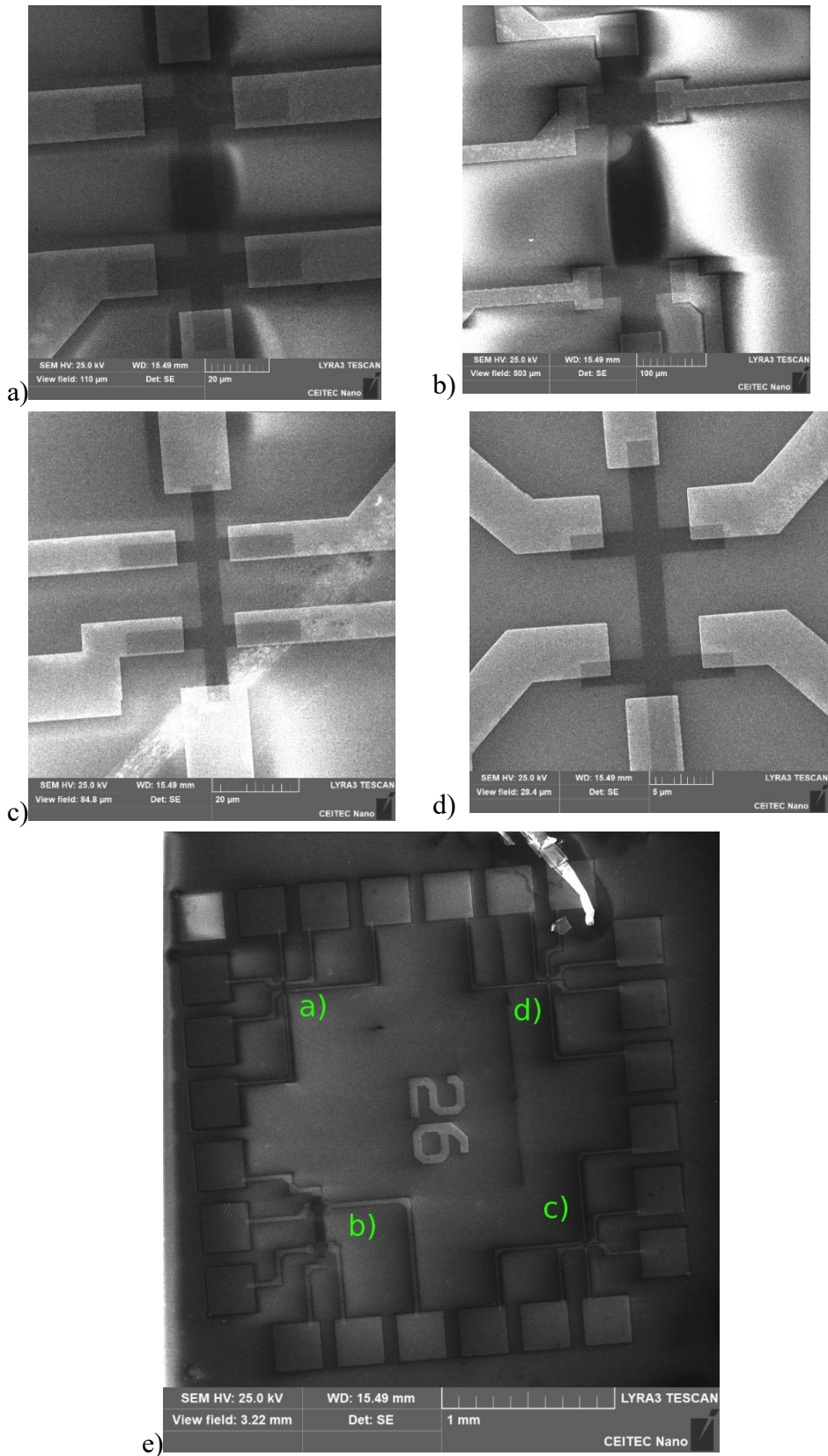


Obr. 2.6: Význam rozměrů uvedených v tabulce 2.1

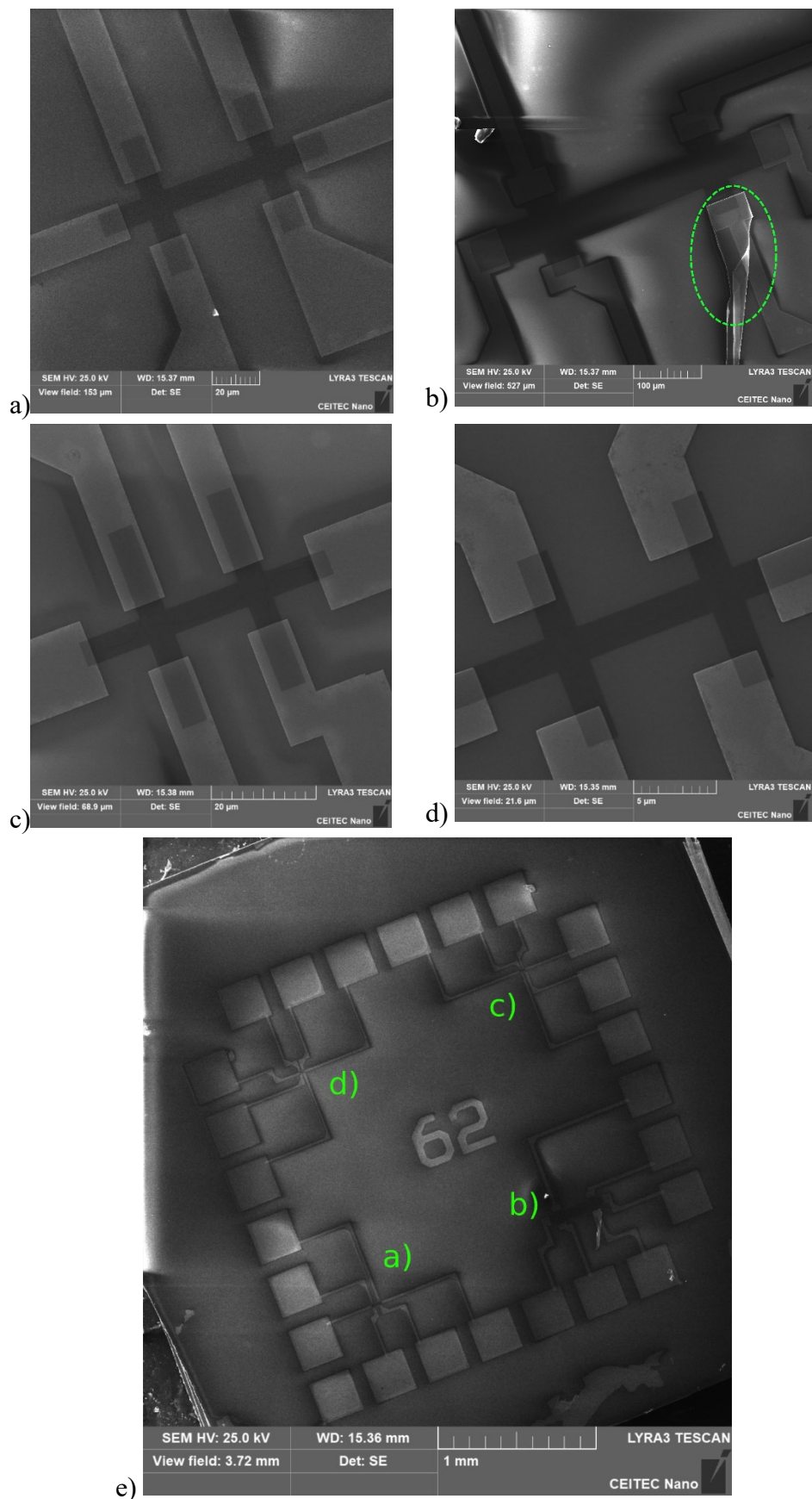
Připravené vzorky byly pomocí grafitové pásky přilepeny k destičce pro kontaktování. Kontaktování bylo provedeno pomocí drátového kontaktování na zařízení Wire bonder TPT HB 16. Pro kontakty byl použit zlatý drátek o tloušťce 25 μm . Fotografický snímek vzorků po kontaktování je zobrazen na obr. 2.7.



Obr. 2.7: Fotografie vzorků po kontaktování a) vzorek D1M26 b) vzorek D5M62



Obr. 2.8: Detail vzorku D1M26.



Obr. 2.9: Detail vzorku D5M62. Na Hall baru b) si lze všimnout zbytku napařeného kovu, který se nepodařilo odstranit při smývání fotorezistu.

2.2. Experimentální uspořádání pro charakterizaci vzorků

Na obr. 2.10 je zobrazeno uspořádání elektrického obvodu pro měření. Jako zdroj napětí byl použit sourcemeter Keithley 2400 nebo Keithley 2410. Pro elektrické hradlování byl použit vysokonapěťový zdroj iseg SHQ 122M. Pro měření signálu na vzorku D1M1 byl použit lock-in zesilovač EG&G 5210. Pro měření na vzorcích D1M26 a D5M62 byl použit lock-in zesilovač SR865A. Přístroje byly ovládány pomocí programu vytvořeném v prostředí LabVIEW, který jsem pro měření vytvořil.

Na obr. 2.10 a) je zobrazeno nejjednodušší zapojení pro měření procházejícího proudu vzorkem. Zdrojem napětí (source meter) je přiloženo konstantní napětí na vzorek. Samotný zdroj je schopen měřit proud procházející obvodem. Z měřeného proudu lze pak dopočítat odpor vzorku. Sériově se vzorkem je zapojen rezistor, který chrání obvod proti případnému elektrickému zkratu. Během měření se svítí mezi kontakty source (S) a drain (D).

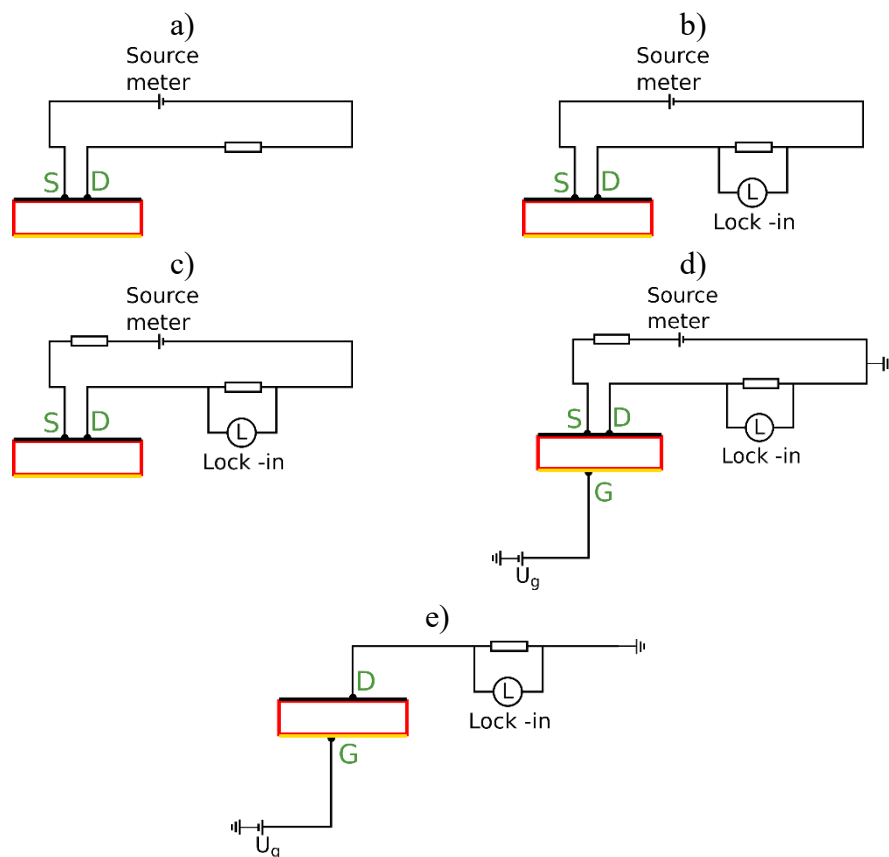
Na obr. 2.10 b) je zobrazen obvod pro měření s lock-in zesilovačem. Zdroj napětí poskytuje konstantní napětí v obvodu. Sériově se vzorkem je zapojen rezistor, na kterém probíhá měření pomocí lock-in zesilovače. Během měření se přerušovaně svítí mezi kontakty source a drain.

Na obr. 2.10 c) je zobrazen obvod pro měření s lock-in zesilovačem, kde je připojen navíc jeden sériový rezistor z důvodu symetrie obvodu pro jednoduchou změnu polohy lock-in zesilovače pro porovnání toku proudu mezi jednotlivými elektrodami v případě přiložení napětí na hradlo.

Obr. 2.10 d) zobrazuje zapojení obvodu v případě použití elektrického hradla, které je připojeno ke kontaktu G s přiloženým hradlovacím napětím U_g . Uzemnění značí, že minusový kontakt lock-in zesilovače, minusový kontakt zdroje a minusový kontakt od zdroje hradla jsou připojeny k stejnému potenciálu.

Obr. 2.10 e) zobrazuje měření fotoproudu pomocí lock-in zesilovače přes semiizolační substrát SiC.

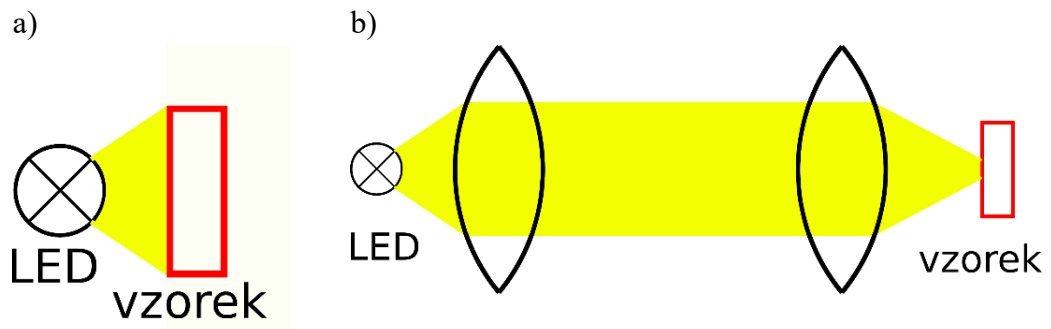
Na obr. 2.11 a 2.12. jsou schematicky vyznačena experimentální uspořádání, kdy se na měřené vzorky svítilo. Pro měření vzorku D1M1 byla použita aparatura zobrazena na obr. 2.11. Použité světlo emitující diody (LED), které byly připojeny ke zdroji Protek PL3005D. Diody byly ovládány pomocí generátoru pulzů Tektronix afg 3000.



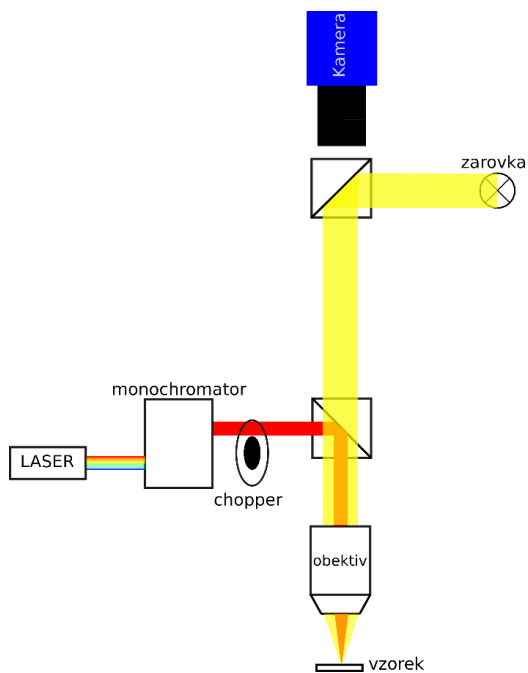
Obr. 2.10: Použitá zapojení obvodu pro měření. Červeně je naznačen substrát, černě vrstva grafenu, žlutě spodní kontakt pro hradlování.

Pro měření na vzorcích D1M26 a D5M62 jsem postavil aparaturu, která je zobrazena na obr. 2.12. Jako zdroj svícení byl použit superkontinuální pulzní vláknový laser SuperK COMPACT s vlnovou délkou světla od 450 nm do 2400 nm. Výkonové spektrum laseru je zobrazeno na obr. 2.13. Výkon laseru je ovládán pomocí změny frekvence od 1 Hz až po 20 kHz. Délka 1 pulzu laseru je kratší než 2 ns [26]. Laser svítil v kvazi kontinuálním režimu, což znamená, že laser svítí pulzně, ale z pohledu měření je vnímán jako kontinuální zdroj. Pro přerušování světla je použit chopper, který přerušuje svazek na výrazně nižší frekvenci, než je frekvence svícení laseru. V zobrazené aparatuře, obr. 2.12, vychází z laseru svazek světla, který následně vstupuje do monochromátoru SPM2 (Carl-Zeiss Jena). Poté světlo prochází skrz sérii zrcátek a chopper až k děliči svazků BS028. Poté byl svazek světla fokusován objektivem na vzorek. Součástí aparatury byla dále žárovka, která sloužila k osvětlení vzorku a kamera, která sledovala stopu laseru zaostřenou na vzorek.

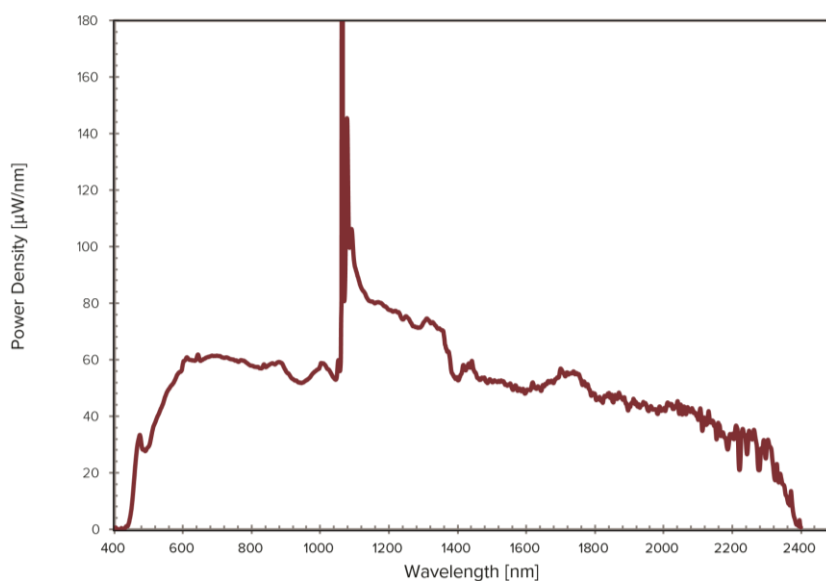
Pokud není uvedeno jinak, měření probíhalo vždy v okolní atmosféře tvořené vzduchem a při pokojové teplotě.



Obr. 2.11: Aparatura pro měření vzorku D1M1.



Obr. 2.12: Aparatura pro měření vzorku D1M26 a D5M62.

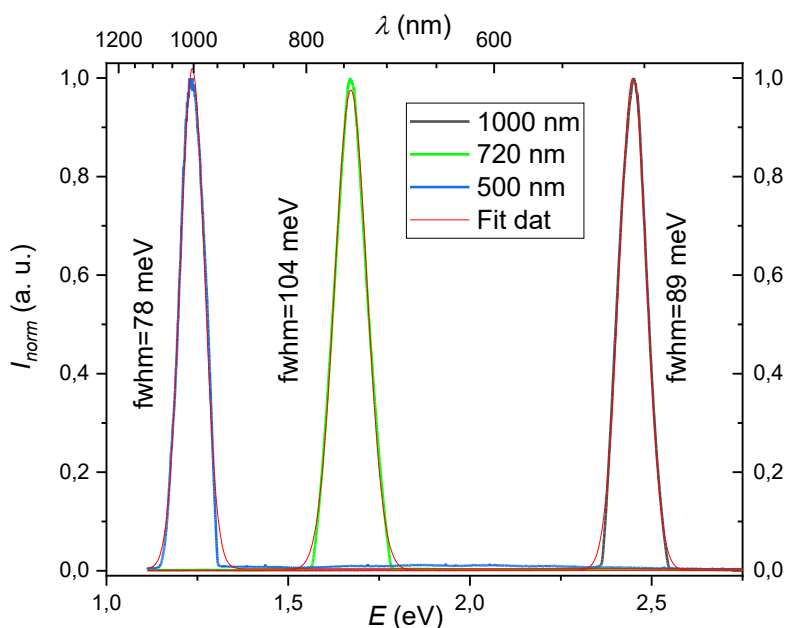


Obr. 2.13: Výkonové spektrum laseru SuperK COMPACT převzato z [26].

Na obr. 2.14 je zobrazena ukázka tří spekter kvazimonochromatického světla z monochromátoru SPM2. Šířka spektra v polovině maxima (FWHM) byla spočtena pomocí Gaussovského fitu. Průměrná hodnota FWHM byla určena jako 100 meV. Vztah mezi standartní odchylkou σ a šířkou v polovině maxima je E_{FWHM}

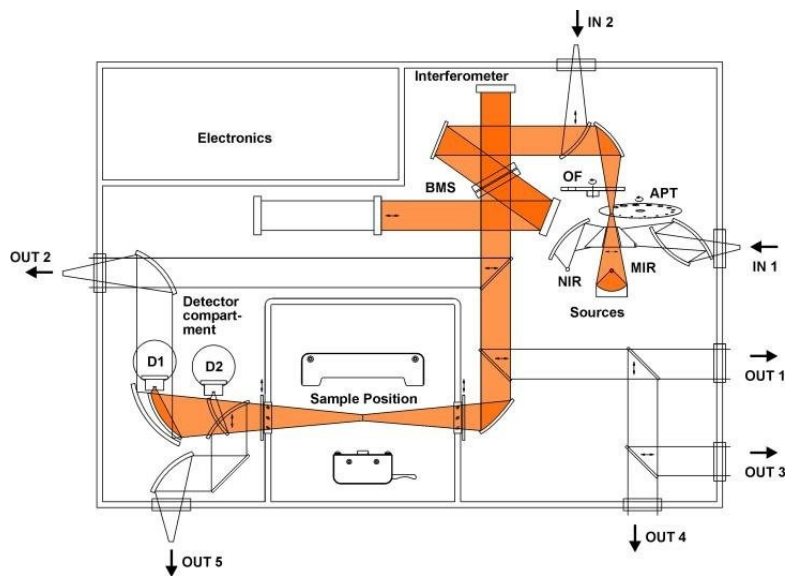
$$\sigma = \frac{E_{FWHM}}{\sqrt{8 \cdot \ln 2}} \quad 2.1$$

Z rovnice 2.1 plyne standartní odchylka 45 meV. Ze standartní odchylky pak mohou určit chybu stanovené energie fotonů pro jevy pozorované z fotovodivostních spekter v kapitole 3.3.



Obr. 2.14: Ukázka kvazimonochromatického světla z monochromátoru.

Pro měření spektrální propustnosti byl použit Fourierivský spektrometr Bruker Vertex 80v. Jako zdroj byla použita halogenová žárovka zobrazená na obr. 2.15 v místě označeném jako sources. Jako druhý zdroj byla použita deuteriová výbojka umístěná na obr. 2.15 v místě in 1. Svazek světla směřuje od zdroje přes sérii zrcátek k děliči svazků z materiálu CaF_2 , kde je světlo rozloženo na dva svazky. Část světla pokračuje k pohyblivému zrcadlu, druhá část světla pokračuje k statickému zrcadlu. Po odrazu od zrcadel se svazky vrátí k děliči svazku, kde se svazky spojí a interferují. Následně je svazek fokusován pomocí parabolického zrcadla na vzorek, který je umístěn v místě Sample Position. Následně je interferogram detekován buď detektorem D1 což je křemíková dioda detekující UV, viditelnou a část blízké infračervené oblasti, nebo je interferogram detekován kapalným dusíkem chlazeným HgCdTe detektorem (D2) detekující blízkou a střední infračervenou oblast. Detekovaný interferogram je následně pomocí počítače Fourierovou transformací převeden na spektrální propustnost.



Obr. 2.15: Schéma Fourierivského spektrometru Bruker Vertex 80v, převzato z [27].

3. Výsledky a diskuse

Nejprve byl měřen vliv adsorpce molekul na odpor vzorku a vliv adsorpce na fotoproud měřený pomocí lock-in zesilovače pro zjištění vlivu okolní atmosféry na elektrické vlastnosti epitaxního grafenu. V druhé podkapitole je uvedena frekvenční závislost fotoproudu, pro zjištění rychlosti odezvy vzorku. Dále byla měřena výkonnostní závislost fotoproudu epitaxního grafenu, která byla následně použita pro kalibraci spektrální závislosti. Třetí podkapitola se zabývá spektrální propustností substrátu a spektrální závislostí fotovodivosti. Bylo snahou identifikovat hladiny a optické přechody související se změnou měřeného fotoproudu v grafenu.

3.1. Vliv adsorpce

Jelikož epitaxní grafen tvoří poslední vrstvu vzorku a je v kontaktu s okolním prostředím, dochází na něm k adsorpci a desorpci různých molekul plynů obsažených ve vzduchu. Vlivem adsorpce těchto molekul dochází ke změnám vodivosti grafenu [18-22].

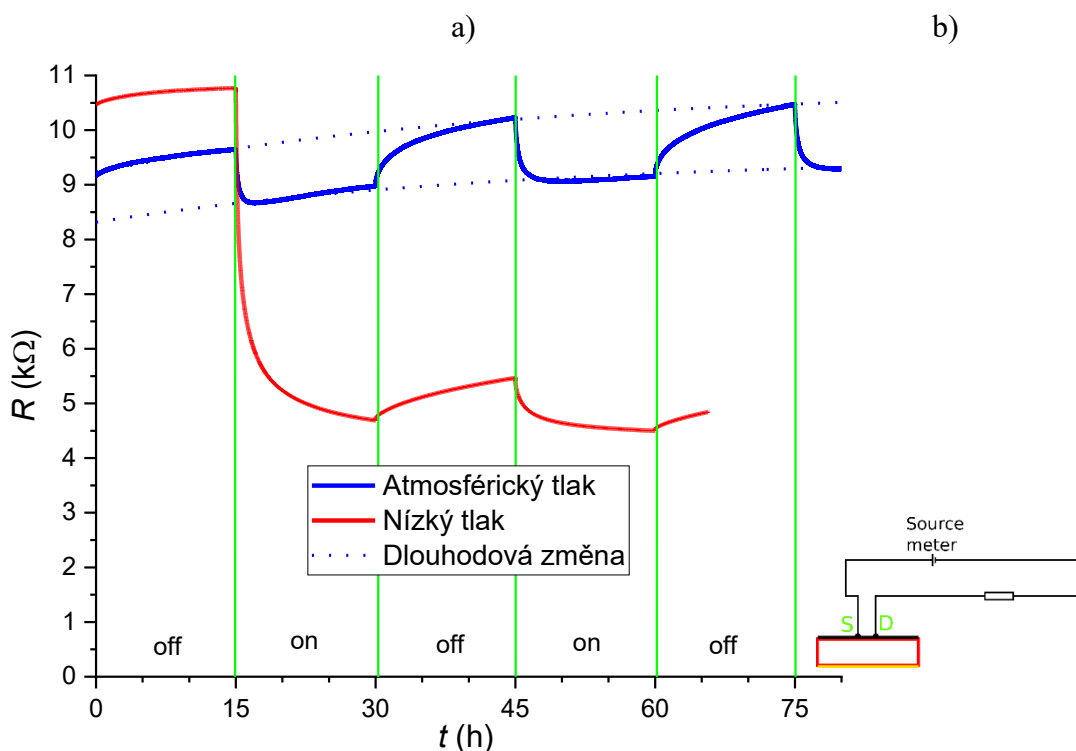
Pro zjištění vlivu adsorpce byl vzorek D1M1 vložen do kryostatu. Vzorek byl zapojen dle diagramu obr. 3.1 b). Jako zdroj záření byla použita LED o vlnové délce 370 nm (LED 370E). Výkon LED byl přibližně 2 mW. Aparatura je naznačena na obr. 2.11 a), přičemž dioda byla spolu se vzorkem umístěna v kryostatu. Vlnová délka 370 nm byla zvolena z důvodu vysoké absorpce světla ve vzorku, jelikož energie fotonů je vyšší než zakázaný pás 6H-SiC. Na vzorek bylo přiloženo napětí 8 V, jako ochranný sériový odpor byl použit 1 k Ω rezistor. Na obr. 3.1 jsou zobrazeny dva časové průběhy pro dvě odlišná měření. Nejprve byl vzorek vložen do kryostatu, který byl evakuován na tlak 2 Pa. Po evakuaci kryostatu bylo spuštěno měření. Měření bylo rozděleno na 15-ti hodinové intervaly, kdy byl vzorek střídavě osvětlen a kdy byl udržován ve tmě (na obr. 3.1 značeno on/off). Pak byl kryostat napuštěn vzduchem a proběhlo obdobné měření v atmosféře vzduchu (v grafu je znázorněno modře).

Změřené časové průběhy elektrických odporů vykazují exponenciální charakter, který vzhledem k okolním podmínkám zřejmě souvisí s adsorpcí či desorpcí, což lze popsat pomocí Lagergrenova modelu, rovnice 1.1. Ze zmíněného důvodu byl časový vývoj elektrického odporu nejprve fitován pomocí dvojité exponenciály, ale fit dat nebyl přesný. Fit dvojitou exponenciálou dal informaci pouze o dvou nejpomalejších časových komponentách, konkrétně v tabulce 3.1 vyznačených jako τ_2 a τ_3 . O nejrychlejší časové komponentě označené v tabulce 3.1 jako τ_1 fit dvojitou exponenciálou informaci nedal. Ze zmíněného důvodu bylo zvoleno fitování trojitou exponenciálou. Měření za nízkého tlaku (2 Pa) bylo fitováno jak po rozsvícení, tak i po vypnutí světla, zobrazeno na obr. 3.1 v časech 30 h, respektive 45 h. Měření v atmosféře vzduchu bylo fitováno po vypnutí světla v čase 30 h trojitou exponenciálou, po zapnutí světla v čase 45 h bylo fitováno dvojitou exponenciálou z důvodu dlouhodobého ustalování signálu, které je v grafu naznačeno tečkovanou křivkou. Jelikož nejprve proběhlo měření za nízkého tlaku, část molekul se

desorbovala z povrchu vzorku. Kryostat byl následně napuštěn okolním vzduchem a spustilo se další měření. Dlouhodobý vývoj byl pravděpodobně způsoben pomalou adsorpcí neznámých molekul ze vzduchu, nebo změnou vlhkosti v místnosti, což může způsobit změnu v koncentraci adsorbovaných molekul.

Zá nízkého (2 Pa) i za atmosférického tlaku ve vzduchu nabývají časové konstanty podobných hodnot, což značí, že dochází k stejným procesům. Je však na první pohled z amplitud časových průběhů proudu zřejmé, že za nižšího tlaku jsou tyto změny menší, což potvrzuje vliv molekul plynů z okolní atmosféry na vodivost grafenu prostřednictvím adsorpce či desorpce. Fitování časové závislosti trojitou exponenciálou naznačuje vliv tří různých přechodových jevů, kterými by mohly být adsorpce/desorpce molekul obsažených ve vzduchu H_2O , C_2O a O_2 [18-22], případně záchyt nosičů na pastech, nebo naopak uvolnění nosičů z pastí. Časové konstanty získané fitováním jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Na obr. 3.1 si lze dále všimnout značného poklesu elektrického odporu po osvětlení vzorku za nízkého tlaku (2 Pa). Odpor vzorku se snížil z 11 k Ω na přibližně 4 k Ω . Takto významná změna je zapříčiněna desorpcí molekul z povrchu, který je tvořen grafenem. Podobný výsledek publikoval Kalkan a kol. [18], kdy vložili vzorek s epitaxním grafenem do vakua a následně 5 000 sekund svítily na vzorek světlem o vlnové délce 254 nm. Následně se vlivem desorpce molekul zvýšila vodivost epitaxního grafenu o 110 %.



Obr. 3.1: a) Vliv adsorpce a desorpce na elektrický odpor vzorku. Čas na ose x je uveden v hodinách, on/off značí, zda je vzorek osvětlen, nebo je vzorek ve tmě. b) zobrazení zapojení elektrického obvodu pro měření.

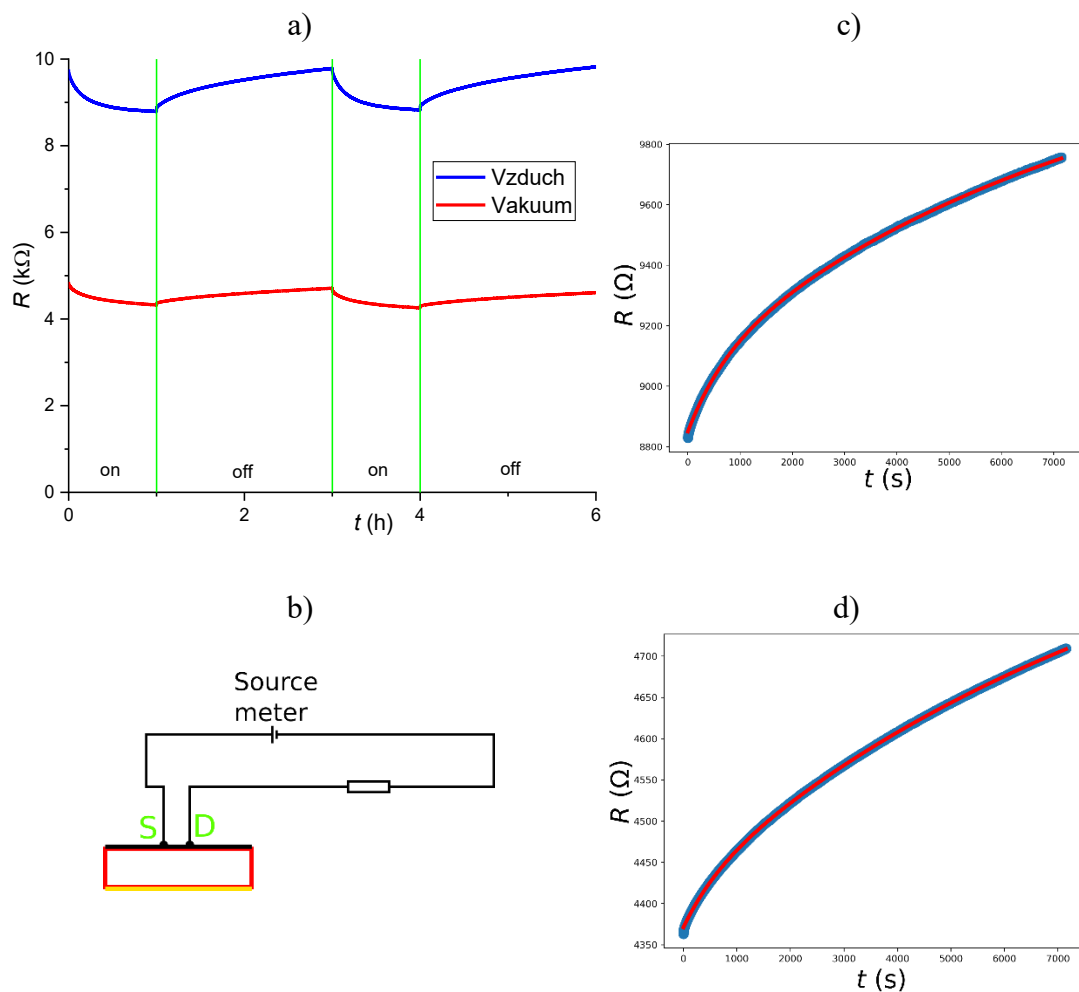
Jemné vakuum						Vzduch				
Po vypnutí světla			Po zapnutí světla			Po vypnutí světla			Po zapnutí	
τ_1 (s)	τ_2 (s)	τ_3 (s)	τ_1 (s)	τ_2 (s)	τ_3 (s)	τ_1 (s)	τ_2 (s)	τ_3 (s)	τ_1 (s)	τ_2 (s)
1 100	8 800	88 300	720	4050	23 900	830	5 700	50 300	636	3074

Tabulka 3.1: Časové konstanty získané fitováním trojitou exponenciálou z měření, které je zobrazeno na obr. 3.1.

Následně bylo zopakováno podobné měření, kdy byl vzorek vložen do kryostatu a proběhlo měření za nízkého tlaku 2 Pa. Následně po napuštění kryostatu vzduchem proběhlo měření v atmosféře vzduchu. Měření bylo provedeno za účelem zjištění, zdali jsou konstanty τ_1 a τ_2 konzistentní pro několik za sebou jdoucích měření. Zapojení obvodu je naznačeno na obr. 2.10 a), jako zdroj světla byla použita LED370E o vlnové délce 370 nm. Výkon LED byl přibližně 2 mW. Aparatura je naznačena na obr. 2.11 a), LED byla spolu s vzorkem umístěna v kryostatu. Na vzorek se střídavě svítilo po dobu jedné hodiny a následně po dobu dvou hodin byl vzorek ve tmě. Cyklus byl několikrát opakován a pomocí zdroje byl zaznamenáván elektrický odpor vzorku. Dva cykly měření jsou zobrazeny na obrázku 3.2 a), následně byla časová závislost fitována dvojitou exponenciálou. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 3.2. Na obr. 3.2 b) respektive c) je ukázán fit dat, který byl proveden pro měření v atmosféře vzduchu, respektive v jemném vakuu.

	Jemné vakuum				Vzduch			
	Po vypnutí světla		Po zapnutí světla		Po vypnutí světla		Po zapnutí světla	
	τ_1 (s)	τ_2 (s)	τ_1 (s)	τ_2 (s)	τ_1 (s)	τ_2 (s)	τ_1 (s)	τ_2 (s)
průměr	611	8138	231	1959	630	6954	250	1027

Tabulka 3.2: Průměr hodnot časových konstant získaných fitováním dvojitou exponenciálou z měření, které je zobrazeno na obr. 3.2.



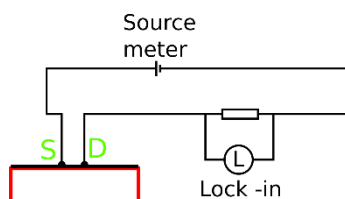
Obr. 3.2: Časová závislost elektrického odporu vzorku v atmosféře vzduchu a v jenném vakuu a) zobrazení dvou cyklů měření b) zobrazení elektrického obvodu c) zobrazení fitu dat v atmosféře vzduchu d) zobrazení fitu v jenném vakuu.

Měření zobrazená na obr. 3.1 a 3.2 vykazují podobné časové konstanty. Zároveň při porovnání měření prováděných na vzduchu a v jenném vakuu jsou opět časové konstanty podobné. Na elektrický odpor vzorku má vliv adsorpce molekul. Z molekul obsažených ve vzduchu se jedná zejména o vodu [18-20], oxid uhličitý [21] a kyslík [22]. Tudíž časové závislosti by mohly být způsobeny adsorpcí a desorpcí molekul. Dále by dlouhé časové závislosti mohly být způsobeny záchytem nosičů na hlubokých pastech v substrátu poblíž rozhraní grafen – SiC a jejich následnou emisí.

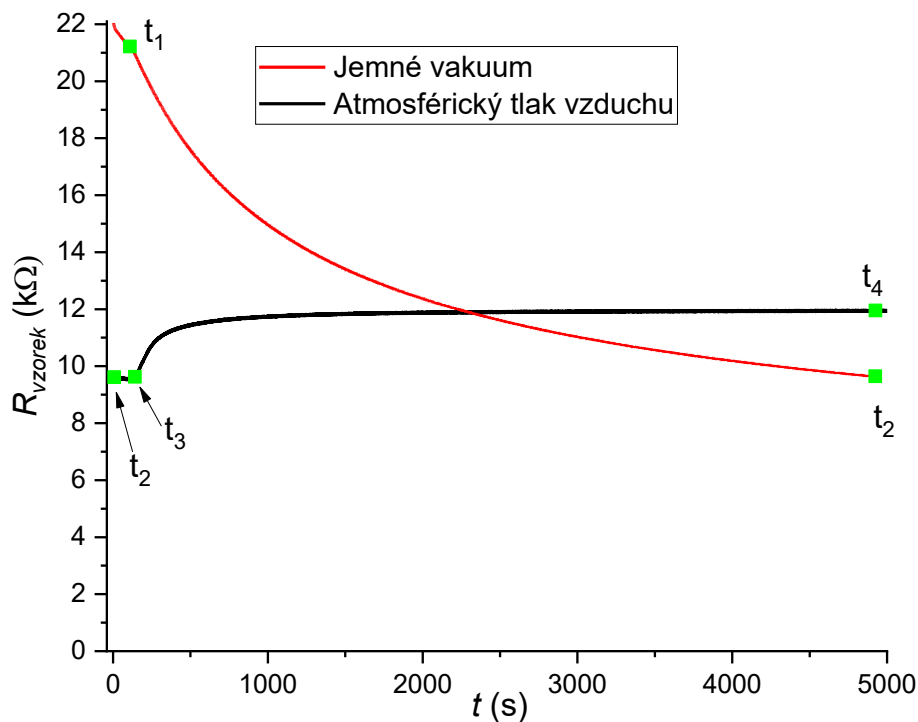
Při dalším měření bylo cílem ověřit, zda adsorpce molekul ze vzduchu má vliv na signál měřený pomocí lock-in zesilovače při přerušovaném svícení. Na vzorek se svítilo pomocí LED o vlnové délce 380 nm, s výkonem přibližně 1 mW, při frekvenci 21 Hz, kdy se půl periody na vzorek svítilo a druhou její polovinu byl vzorek ve tmě. Zhasínání a rozsvěcování diody bylo ovládáno generátorem pulzů. Zapojení elektrického obvodu je zobrazeno na obr. 3.3, jako měřicí elektrický odpor byl použit 1 k Ω rezistor. Zobrazení aparatury je naznačeno na 2.11 b). Na vzorek D1M1 bylo přiloženo napětí 10 V.

Během měření bylo zaznamenáváno jak napětí a proud na zdroji, tak periodická změna napětí měřená na měřicím rezistoru pomocí lock-in zesilovači. Výsledky měření jsou zobrazeny na obr. 3.4 a 3.5. Na obr. 3.4 je zobrazen elektrický odpor vzorku v závislosti na čase, na obr. 3.5 je zobrazena změna proudu protékající obvodem měřená pomocí lock-in zesilovače v závislosti na odporu vzorku. Vzorek byl vložen do kryostatu, kde se na něj svítilo s frekvencí 21 Hz. V čase t_1 byla spuštěna vývěva a začala evakuace kryostatu. Požadovaného tlaku (2 Pa) bylo dosaženo za přibližně jednu minutu. Na obr. 3.4 je vidět pokles odporu vzorku s časem (obr. 3.4 červeně) až do času t_2 . Následně měření pokračuje dál a je vyznačeno černou čarou. V čase t_3 byl kryostat napuštěn vzduchem a odpor vzorku vzrostl. Měření dále pokračovalo až do času t_4 . Během celého měření se na vzorek svítilo s frekvencí 21 Hz.

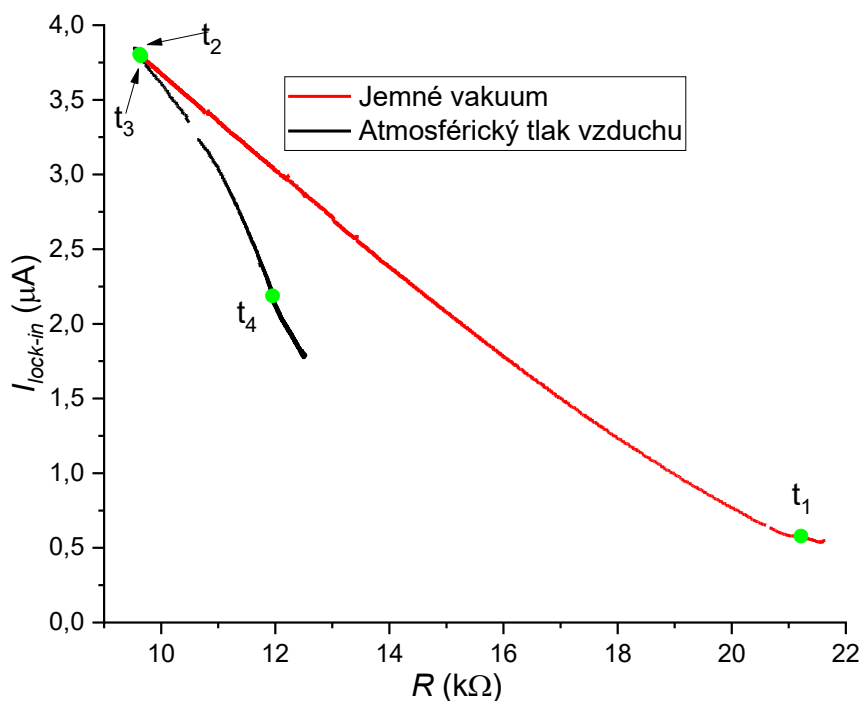
Na obr. 3.5 je zobrazen foton proud měřený pomocí lock-in zesilovače v závislosti na odporu vzorku. Časy t_1 až t_4 odpovídají časům z obr. 3.4. Od evakuace kryostatu v čase t_1 značně roste signál vzorku s klesajícím odporem. V čase t_3 byl kryostat napuštěn vzduchem a odpor vzorku mírně vzrostl přibližně o 3 k Ω . Měřený foton proud na lock-in zesilovači klesl přibližně na polovinu. Zřetele vhodnou vlastností je, že při stejném odporu vzorku nabývá signál měřený lock-in zesilovačem rozdílných hodnot v závislosti na vnější atmosféře. Provedené měření prokazuje vliv adsorpce molekul vzduchu na měřený signál pomocí lock-in zesilovače.



Obr. 3.3: Zobrazení obvodu pro měření, která jsou zobrazena na obrázcích 3.4-3.9.

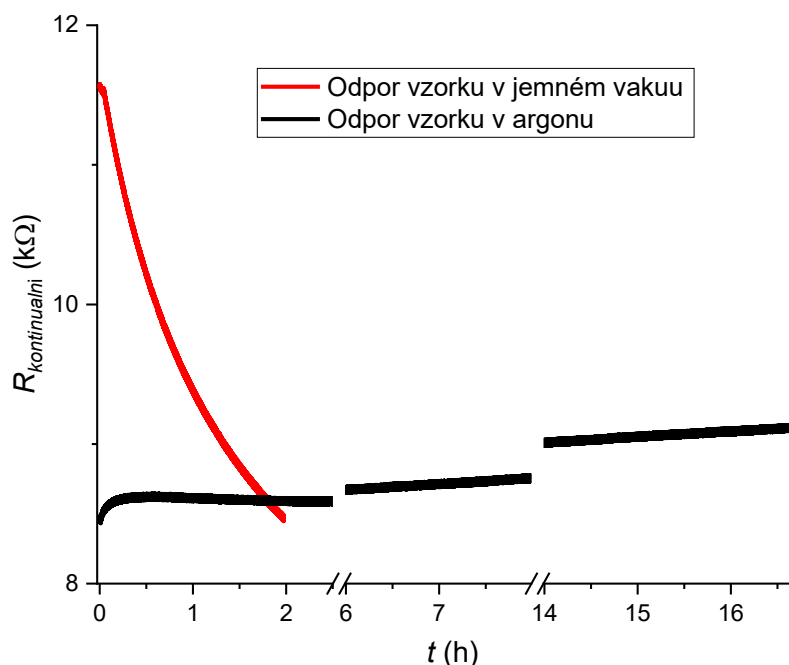


Obr. 3.4: Časová závislost odporu vzorku DIM1 v jemném vakuu a v atmosféře vzduchu. V čase t_1 začala evakuace kryostatů. Časy t_2 na sebe navazují. V čase t_3 byl kryostat napuštěn vzduchem.

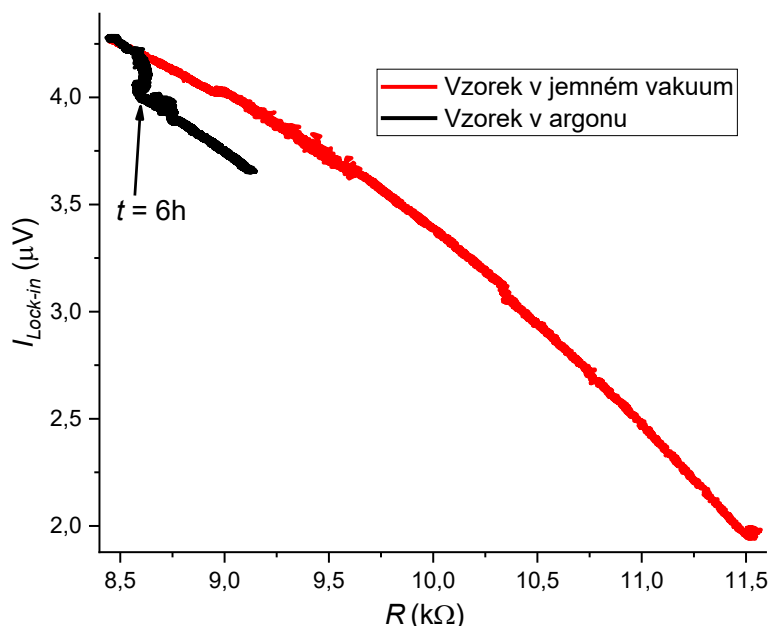


Obr. 3.5: Závislost signálu lock-in zesilovače na elektrickém odporu vzorku v jemném vakuu a v atmosféře vzduchu. Zvýrazněné časy t_1 až t_4 odpovídají bodům na obr. 3.4.

Obdobné měření bylo provedeno se stejným postupem měření a stejnou aparaturou, pouze kryostat nebyl napuštěn vzduchem, ale inertním plynem – argonem. Cílem měření bylo zjistit, zda okolní atmosféra tvořená inertním plynem má vliv na fotovodivost grafenu. Měření je zobrazeno na obr. 3.6 a 3.7. Po napuštění kryostatu argonem došlo pouze k mírnému vzrůstu elektrického odporu vzorku a mírnému snížení signálu v porovnání s měřením v atmosféře vzduchu. Napuštění argonem proběhlo pouze jednou, pak se argon do kryostatu nedopouštěl. Na obr 3.7 je vyznačen šipkou okamžik, jaký byl signál na lock-in zesilovači po 6 hodinách od napuštění kryostatu argonem. Následný poměrně pomalý pokles signálu byl pravděpodobně způsoben netěsností kryostatu, kde se do kryostatu mohla dostat vzdušná vlhkost, či jiné plyny, které se mohou adsorbovat na grafenu a změnit tak jeho vodivost, nebo pomalou desorpcí molekul ze stěn kryostatu a následnou adsorpcí na vzorek.



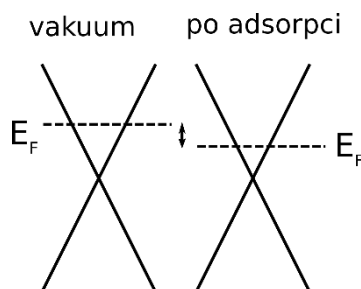
Obr. 3.6: Časová závislost elektrického odporu vzorku DIM1 v jemném vakuu (2 Pa) a v argonu.



Obr. 3.7: Závislost signálu lock-in zesilovače na elektrickém odporu vzorku v jenném vakuu (2 Pa) a v atmosféře argonu. V grafu je vyznačeno místo znázorňující měřený fotoproud po 6 hodinách od napuštění krystalu argonem.

Pro jednovrstvý epitaxní grafen bez interkalace se dá předpokládat, že má n-typovou vodivost [13], naznačeno na obr. 1.8. Články [18-22] zmiňují vliv adsorpce molekul na vodivost grafenu. Z molekul obsažených ve vzduchu se jedná zejména o vodu [18-20], oxid uhličitý [21] a kyslík [22]. Zjednodušená pásová struktura grafenu je zobrazena na obr. 3.8, kde lze předpokládat, že vlivem adsorpce molekul může dojít k dopování grafenu a následně může dojít k poklesu Fermiho energie. Důsledkem toho k poklesu počtu elektronů ve vodivostním páse, což vede k poklesu vodivosti.

Z měření plynou vhodné podmínky pro případný provoz optického hradlování. Nejvyšší efektivity a stability optického spínání lze docílit pomocí minimalizace adsorpce molekul na povrchu, například vložením vzorku do vysokého vakuu, kde nedochází k adsorpci molekul z okolí. Další možností snížení vlivu adsorpce molekul a stabilizace proudu v grafenu je použití inertní atmosféry či vhodná pasivace grafenu vhodnou izolační vrstvou.



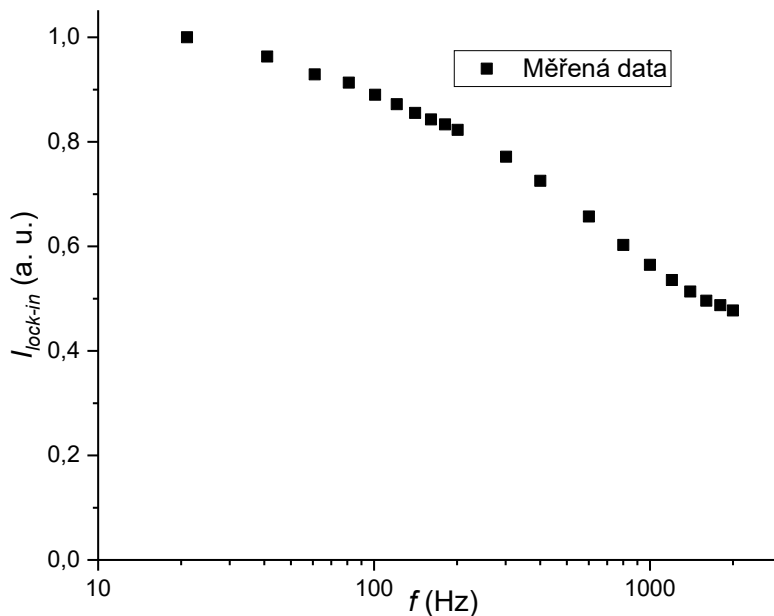
Obr. 3.8: Vliv adsorpce na Fermiho mez vzorku.

3.2. Frekvenční a výkonová závislost

Kromě časové závislosti byla měřena frekvenční závislost, jejíž cílem bylo zjištění rychlosti spínání součástek založených na epitaxním grafenu pomocí světla a jejich frekvenční limitaci.

Frekvenční závislost byla na vzorku D1M1 měřena pomocí LED s vlnovou délkou 365 nm (M365FP1) s výkonem 10 mW. Frekvence diody byla ovládaná pomocí generátoru pulzů od 20 Hz po 2000 Hz, vyšší frekvence již nemohla být zvolena z důvodu rychlosti odezvy LED, kdy již tato světelná dioda zcela nepohasínala. Na vzorku bylo přiloženo napětí -9 V, zapojení obvodu je zobrazeno na obr. 2.10 b) měřící sériový rezistor měl elektrický odpor 1 k Ω . Měření bylo provedeno v atmosféře vzduchu. Schéma měřící aparatury je na obr. 2.11 b). Změřená proudová odezva vzorku normalizovaná na nízkofrekvenční (20 Hz) hodnotu proudu je zobrazena na obr. 3.9.

Pro nejvyšší měřenou frekvenci 2 kHz je proudová odezva vzorku na přerušované osvětlení zhruba poloviční oproti nízkým frekvencím. Nebyl však pozorován výrazný pokles odezvy, z čehož je patrné, že optické dopování grafenu má potenciál být funkční i pro vyšší frekvence.



Obr. 3.9: Normalizovaná odezva v závislosti na frekvenci svícení.

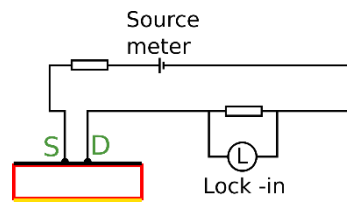
Za účelem studia možné generace nosičů náboje pomocí optických přechodů v zakázaném pásu substrátu SiC a jeho vlivu na vodivost grafenu potenciálně využitelnou při optickém hradlování, bylo provedeno měření proudu v grafenu se svícením podgapovým světlem. Inspirací pro měření byly práce [28, 29], v nichž se podařilo snížit elektrický odpor semiizolačního vanadem dopovaného 6H-SiC z řádově $M\Omega$ na Ω s použitím ns pulzů z Nd:YaG laseru o vlnové délce 1064 a 532 nm. Simulace uvedená v [28] ukázala na změnu vnitřního elektrického pole v SiC po osvětlení. To by mohlo vést ke změně hustoty volných nosičů náboje v epitaxním grafenu způsobem, jaký je naznačen níže v úvodu části 3.2.1.

Na obr. 3.11 je zobrazena výkonová závislost fotovodivosti pro grafen na vzorku D1M1 a pro měření na substrátu D1 obr 2.3. Zapojení obvodu je zobrazeno na obr. 3.10, oba znázorněné rezistory měly odpor 1 k Ω . Aparatura je naznačena na obr. 2.11. Jako zdroj světla byla použita druhá harmonická frekvence z Nd-YAG laseru o vlnové délce 532 nm, energie fotonů je nižší než zakázaný pás SiC, tudíž absorpce světla v substrátu se děje pouze přes hladiny v zakázaném pásu a je nízká oproti nadgapovému světlu. Laser byl použit z důvodu vysokého výkonu a potenciálu aktivovat optické přechody s aktivačními energiemi 2,33 eV a nižšími, což umožňuje excitovat pravděpodobné hluboké hladiny související s vanadovým dopováním, či přirozenými defekty v krystalové mřížci. Průměr stopy svazku byl 2 mm. Pro přerušování signálu byl použitý chopper, který zajišťoval frekvenci svícení 28 Hz. Měření bylo provedeno v okolní atmosféře. Pro měření na grafenu bylo použito napětí 1 V, pro měření na substrátu 20 V. Hodnoty pro substrát D1 zobrazeny na obr. 3.11 byly vyděleny 20-ti za účelem porovnání proudu v grafenu a SiC. Signál měřený v substrátu byl pro nízký výkon laseru kvůli šumu špatně měřitelný, proto byla na obr. 3.11 provedena extrapolace pro nízký výkon laseru. Během měření byly zaznamenány hodnoty z lock-in zesilovače a postupně se zvyšoval výkon z 0,8 mW až po 3 W. Poté byla ještě jednou proměřena hodnota pro 130 mW.

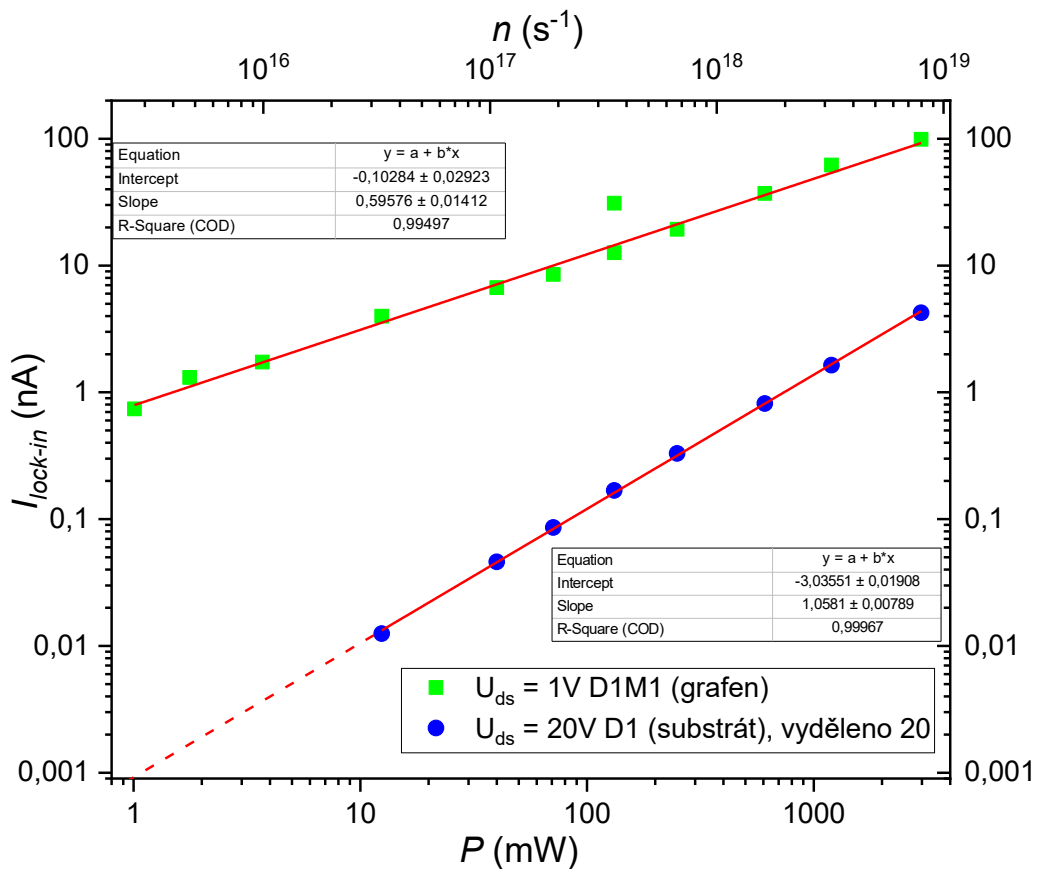
Statický proud procházející substrátem D1 vzrostl z 60 pA za tmy, na hodnotu 60 nA při svícení výkonem 3 W na vzorek. U epitaxního grafenu, vzorek D1M1, vzrostl proud z 25,8 μ A za tmy na hodnotu, na hodnotu 27,6 μ A při maximálním osvětlení. Měřený fotoproud pomocí lock-in zesilovače je pro epitaxní grafen o tři řády nižší než časově vystředovaný proud tekoucí grafenem měřený sourcemeterem. Pro substrát byla měřena hodnota fotoproudu lock-in zesilovačem 84,7 nA z čehož vyplývá, že po osvětlení SiC je fotoodezva téměř okamžitá. Statický proud může být nižší než proud měřený pomocí lock-in zesilovače, protože statický proud průměruje hodnotu proudu za celou periodu, naopak lock-in zesilovač měří výšku amplitudy, tudíž proud měřený lock-in zesilovačem může být až dvojnásobný oproti proudu měřenému pomocí zdroje.

Závislost proudu na optickém výkonu laseru je uvedena v logaritmickém měřítku. Následně byla proložena lineární závislostí. U měření substrátu vychází směrnice téměř 1, což odpovídá případu, kdy počet fotogenerovaných elektronů nebo

děr a zároveň odvedených nosičů k elektrodám je lineární s počtem dopadajících fotonů. Naopak u vzorku s grafenem je pozorována závislost sublineární se směrnicí přibližně 0,6. Dále je u grafenu pozorována závislost na historii dopadající intenzity. Pro výkon světla dopadajícího na vzorek 130 mW, kdy předchozí výkon laseru byl 70 mW, vychází foton proud 12,6 nA. V případě, že měřené hodnotě předcházela dopadající výkon 3 W, vychází pro výkon dopadajícího světla 130 mW hodnota foton proud 31 nA. Rozdíl ve foton proudu je přibližně trojnásobný. Zmíněná sublineární směřnice a rozdíl v měřených hodnotách pro výkon laseru 130 mW mohou být způsobeny akumulací prostorového náboje u rozhraní grafen SiC nebo vlivem desorpce molekul z povrchu vzorku po ozáření vzorku vysokým výkonem.



Obr. 3.10: Obvod pro měření výkonostní závislosti zobrazené na obr. 3.11.



Obr. 3.11: Výkonová závislost vzorku D1M1 s grafenem a substrátu D1 bez grafenu. Hodnoty pro substrát D1 jsou vyděleny 20. Horní vodorovná osa zobrazuje fotonový tok.

3.2.1. Hradlování přes spodní kontakt

Na obr. 2.10 d) je zobrazeno zapojení obvodu pro hradlování grafenového kanálu přes spodní kontakt, ke kterému je připojeno hradlovací napětí. Princip vlivu hradlování na vodivost v grafenu je zobrazen na obr. 3.12, kde je schematicky zobrazen průběh elektrického pole mezi spodním kontaktem vzorku a grafenem na horním kontaktu vzorku. Obr. 3.12 (1) zobrazuje konstantní elektrické pole E mezi elektrodami semiizolačního substrátu, který lze považovat za deskový kondenzátor, které je

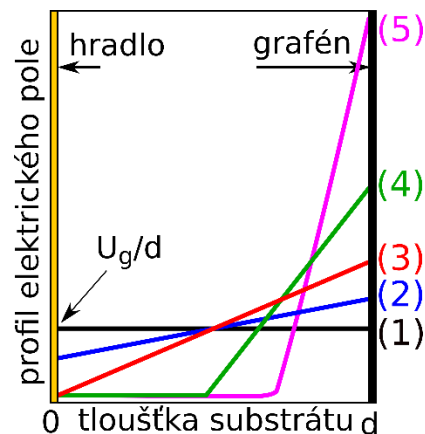
$$E = U_g/d. \quad 3.1$$

Zde U_g je napětí přiložené na hradlo a d je tloušťka vzorku. Povrchová hustota náboje související s elektrickým polem E pod grafenovou vrstvou způsobí změnu koncentrace nosičů Δn v této vrstvě, které je

$$\Delta n = \varepsilon E/e = \varepsilon U_g/(ed), \quad 3.2$$

kde ε je permitivita SiC a e je elementární náboj. Změna koncentrace nosičů Δn ve vrstvě grafenu způsobí změnu ve vodivosti grafenu.

V případě vhodného osvětlení vzorku může dojít k výrazné akumulaci prostorového náboje díky záchytu fotogenerovaných nosičů ve vzorku na pastech, což může způsobit zesílení pole pod jednou z elektrod, jak je naznačeno na křivkách (2-5). Křivky (4-5) zobrazují akumulaci velkého prostorového náboje, který způsobuje stínění elektrického pole v téměř celém vzorku, a naopak pod grafenovým vodivým kanálem je elektrické pole zesíleno (plocha pod křivkou profilu elektrického pole se pro dané U_g zachovává). Dle rovnice 3.2 se v důsledku zesílení pole pod povrchem zvýší koncentrace Δn volných nosičů náboje, který způsobí zvýšení vodivosti grafenu.



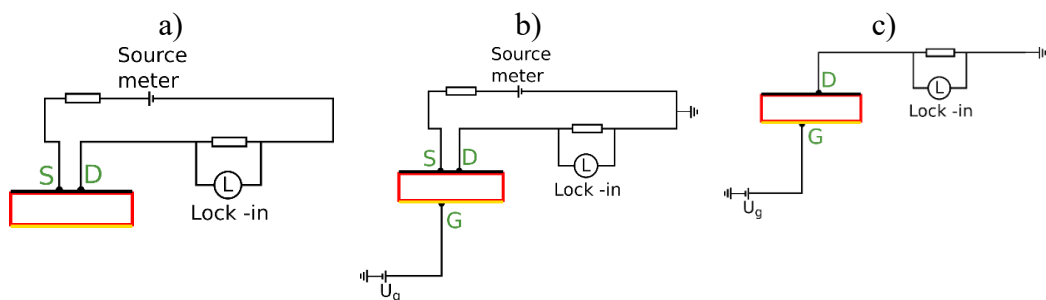
Obr. 3.12: Naznačení průběhu elektrického pole mezi elektrodami. (1) bez prostorového náboje, (2)-(5) s prostorovým nábojem, plocha pod křivkami je vždy konstantní.

Pro ověření zmíněné hypotézy byl změřen fotoproud protékající grafenem (zapojení obvodu naznačeno na obr. 3.13 a), a následně bylo přiloženo napětí na hradlo (zapojení obvodu naznačeno na obr. 3.13 b) a tyto situace byly prostudovány.

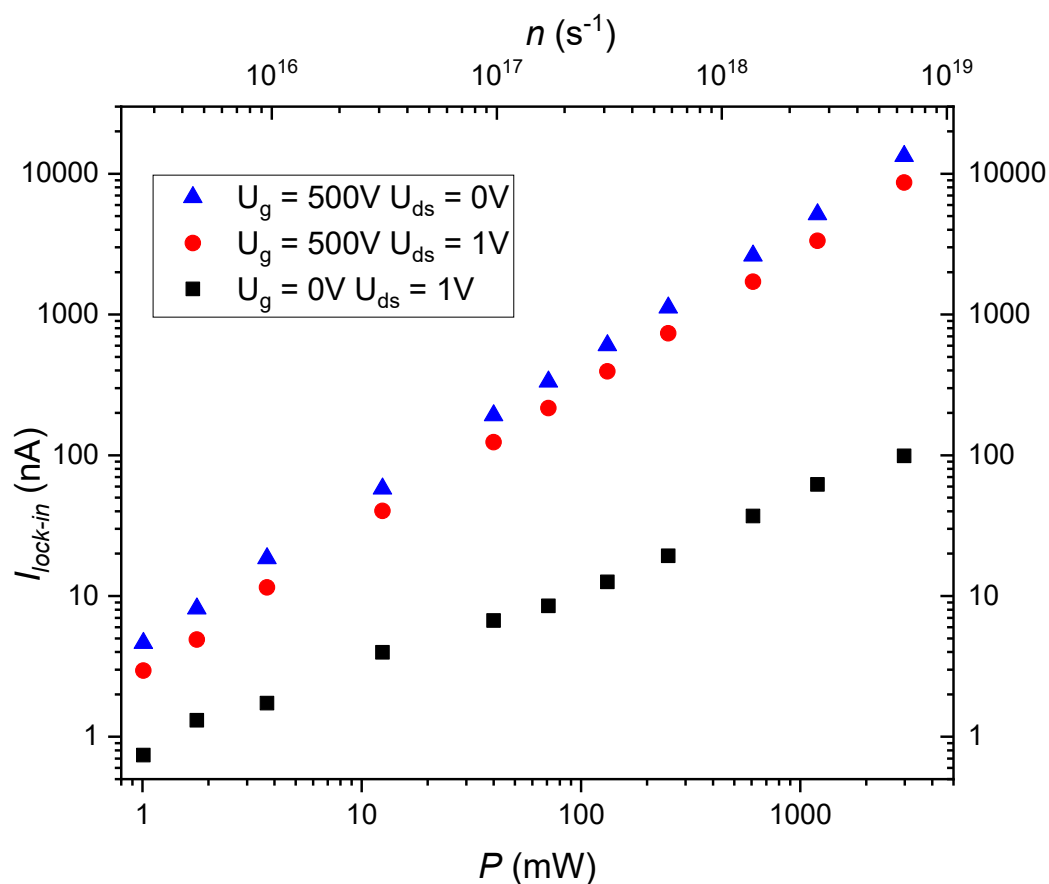
Jako zdroj světla byl použit Nd:YaG laser o vlnové délce 532 nm. pomocí chopperu byla nastavena frekvence svícení na vzorek na 28 Hz. První měření proběhlo pouze přes grafenový kanál obr. 3.13 a) a je znázorněno na obr. 3.14 černými čtverečky, oba znázorněné rezistory měly odpor 1 k Ω . Měřila se závislost fotoproudu na výkonu laseru. Na vzorek bylo přiloženo napětí 1 V. Měření je totožné s měřením zobrazeným na obr. 3.11 se sublineární směrnicí 0,6. Následně bylo k vzorku přiloženo hradlovací napětí 500 V (zapojení zobrazeno na obr. 3.13 b) a byla změřena závislost fotoproudu na světelném výkonu, na obrázku 3.14 je zobrazena červenými kroužky. Měření vykazuje značný rozdíl měřeného fotoproudu po přiložení napětí, proto bylo potřeba ověřit, zda neteče proud od hradla přes substrát do grafenové vrstvy.

Pro ověření, zda měřený fotoproud teče mezi kontakty source a drain, nebo mezi hradlem a grafenem, bylo použito zapojení, zobrazeno na obr. 3.13 c), kde se měřil fotoproud přes substrát, ke kterému bylo přiloženo napětí 500 V. Opět se měřil fotoproud pomocí lock-in zesilovače. Na obrázku 3.14 je měření zobrazeno modrými trojúhelníky.

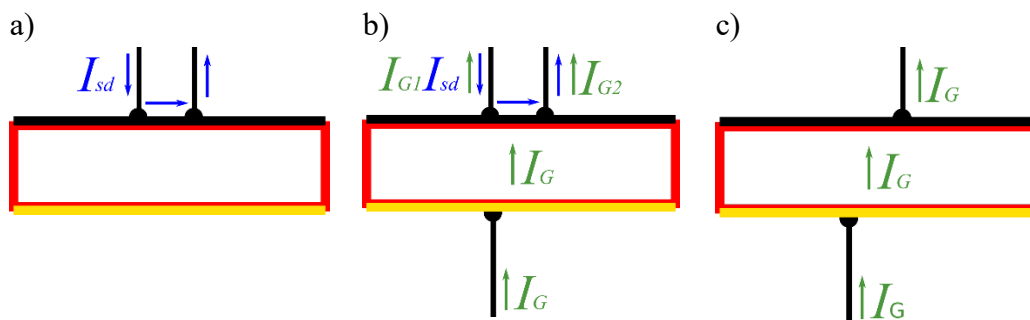
Měřený fotoproud přes substrát je vyšší než při měření přes grafenový kanál. Z toho vyplývá, že vzrůst měřeného signálu při přiložení hradlovacího napětí byl způsoben zejména tokem proudu od hradla přes substrát ke grafenové vrstvě. Na obr. 3.15 je naznačen předpokládaný tok proudu pro jednotlivá měření. Vlivem přiloženého napětí U_G (obr. 3.15 b) je v substrátu generován fotoproud, jehož část se sečte s proudem v grafenu a je měřen pomocí lock-in zesilovače. Na obr. 3.15 c) je zobrazen v substrátu generovaný fotoproud, který celý teče do měřícího odporu a je měřen lock-in zesilovačem. Vliv elektrického hradlování na fotovodivost epitaxního grafenu nešlo v důsledku parazitických proudů použitým experimentem ověřit.



Obr. 3.13: Zobrazení elektrických obvodů pro měření zobrazeno obr. 3.14.



Obr. 3.14: Závislost proudu měřená pomocí lock-in zesilovače na výkonu laseru. Černě znázorněná data odpovídají zapojení obvodu na obr. 3.13 a) předpokládáný tok proudu je naznačen na obr. 3.15 a). Červeně znázorněná data odpovídají zapojení obvodu na obr. 3.13 b) předpokládáný tok proudu je naznačen na obr. 3.15 b). Modře znázorněná data odpovídá zapojení obvodu na obr. 3.13 c) předpokládáný tok proudu je naznačen na obr. 3.15 c).



Obr. 3.15: Naznačení toku proudu přes vzorek pro jednotlivá zapojení obvodu. a) předpokládám tok proudu pouze přes vrstvu grafenu. b) fotoproud I_G teče mezi spodním hradlovacím kontaktem a horním grafenovým. Část proudu odtéká spolu s proudem I_{sd} (I_{G2}), část proudu snižuje příchozí proud I_{sd} (I_{G1}). c) Není připojen zdroj mezi kontakty source drain a proud teče pouze od hradla směrem ke grafenové vrstvě.

3.3. Spektrální závislosti

Cílem měření spektrální propustnosti substrátu SiC a spektrálně závislé fotovodivosti epitaxního grafenu na SiC bylo ověřit, zda se v zakázaném pásu substrátu nalézají aktivní energetické hladiny ovlivňující fotovodivost substrátu pomocí prostorového náboje (elektronového nebo děrového), který má vliv na vodivost grafenu. U grafenu předpokládám uniformní absorpci 2,3 % [30] v širokém spektrálním oboru.

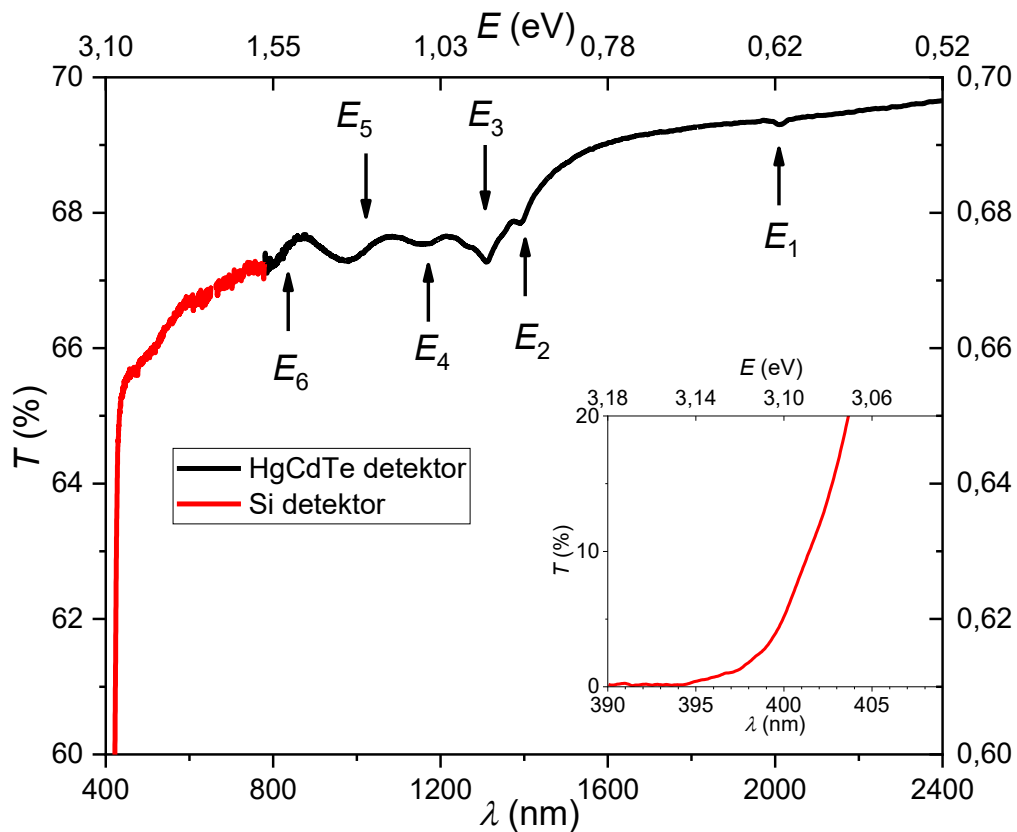
Pomocí fourierovského spektrometru Bruker Vertex 80v byly změřeny spektrální optické propustnosti substrátu 6H-SiC, obr. 3.16. Jelikož cílem bylo změřit široké spektrum spektrální propustnosti, bylo nutné použít různé zdroje záření a detektory. Pro měření od 385 nm do 1150 nm byl použit detektor tvořený křemíkovou fotodiodou a jako zdroj záření byla použita deuteriová lampa. Pro měření od 700 nm do 4 μm byl použit kapalným dusíkem chlazený fotovoltaický detektor na bázi HgCdTe. Zdrojem záření byla halogenová žárovka. Spektra na sebe byla navázána na vlnové délce 780 nm. Spektrální optická propustnost T byla určena podle vztahu

$$T = \frac{I_s}{I_e}, \quad 3.3$$

kde I_s je změřená spektrální intenzita s vloženým vzorkem a I_e je zaznamenaná spektrální intenzita bez vzorku. Z měření spektrální propustnosti lze určit energii hladin a následně pomocí literatury identifikovat přítomnost příměsí a defektů v substrátu, tabulka 3.3.

Označení	λ (nm)	E (eV)	Pravděpodobný původ hladiny
E_1	2010	0,62	Vanadová příměs V^{3+} [31]
E_2	1390	0,89	Vanadová příměs $V^{3+/4+}$ na pozici k_1/k_2 [32]
E_3	1310	0,95	Křemíková vakance [32]
E_4	1160	1,07	Si-C divakance [7]
E_5	980	1,27	Vanadová příměs $V^{4+/5+}$ na pozici k_1/k_2 [32]
E_6	790	1,56	Vanadová příměs $V^{4+/5+}$ [31]

Tabulka 3.3: Identifikované hladiny tvořené příměsemi a defekty nalezené pomocí měření spektrální propustnosti, které je zobrazeného na obr. 3.16.



Obr. 3.16: Spektrální optická propustnost substrátu 6H-SiC měřena dvěma různými detektory.

Následně byla změřena spektrální závislost fotovodivosti vzorku D1M26 na Hall baru znázorněném na obr. 2.8 a). Použitá aparatura je naznačena na obr. 2.12, zapojení obvodu na obr. 2.10 b). Měření probíhalo s přiloženým napětím 0,5 V. Jako měřicí odpor byl použit sériový rezistor s odporem 47,6 k Ω . Odpor vzorku byl přibližně 23 k Ω . Tomu odpovídá napětí na vzorku 0,16 V. Kontakty, mezi kterými probíhalo měření, jsou vyznačeny na obr. 3.18 spolu se stopou svazku. Jelikož šířka přívodového kanálu je 14 μm , průměr stopy svazku byl odhadnut přibližně na 15 μm . Z důvodu spektrální efektivity zdroje a monochromátoru byl použit rozdílný fotonový tok. Pro jednotlivé intervaly vlnových délek je fotonový tok uveden v tabulce 3.4 spolu s výkonem a intenzitou. Měření bylo provedeno při frekvenci 63 Hz. Pro měření byl použit lock-in zesilovač SR-865A. Použitý fotonový tok je zobrazen v tabulce 3.4.

Lock-in zesilovač měří amplitudu periodicky měnícího se signálu o zvolené frekvenci pomocí dvou kanálů, konkrétně kanálu X s rozsahem R_{lock} od hodnot $-R_{lock}$ do $+R_{lock}$ a pomocí kanálu Y posunutém o 90° s rozsahem opět od $-R_{lock}$ do $+R_{lock}$. Jiný možný zápis je pomocí amplitudy $A = \sqrt{X^2 + Y^2}$ a fáze φ . V případě, že by se změnil typ fotovodivosti z pozitivní fotovodivosti (zvýší se proud po osvětlení vzorku) na negativní fotovodivost (sníží se proud po osvětlení vzorku) pak by se měla změnit fáze θ lock-in zesilovače o 180° .

Na obr. 3.17 a) je uveden normovaný fotoproud v závislosti na vlnové délce. Délka chybových úseček je rovna hladině šumu signálu za tmy. Mezi 1 000 a 1050 nm se změnil fotonový tok laseru (tabulka 3.4). Data s rozdílným fotonovým tokem byla normována pomocí výkonnostní závislosti uvedené na obr. 3.11. Data jsem normoval podle vztahu

$$I_n = \left(\frac{Q_0}{Q_m}\right)^s \cdot I_m \quad 3.4$$

kde Q_0 je referenční fotonový tok (v případě použitého měření se jedná o fotonový tok mezi 600 a 1000 nm). Q_m je fotonový tok odpovídající naměřené hodnotě fotoproudu I_m který chci nanormovat a I_n je normovaná hodnota fotoproudu. s je směrnice získaná proložením výkonnostní závislosti zobrazené na obr. 3.11.

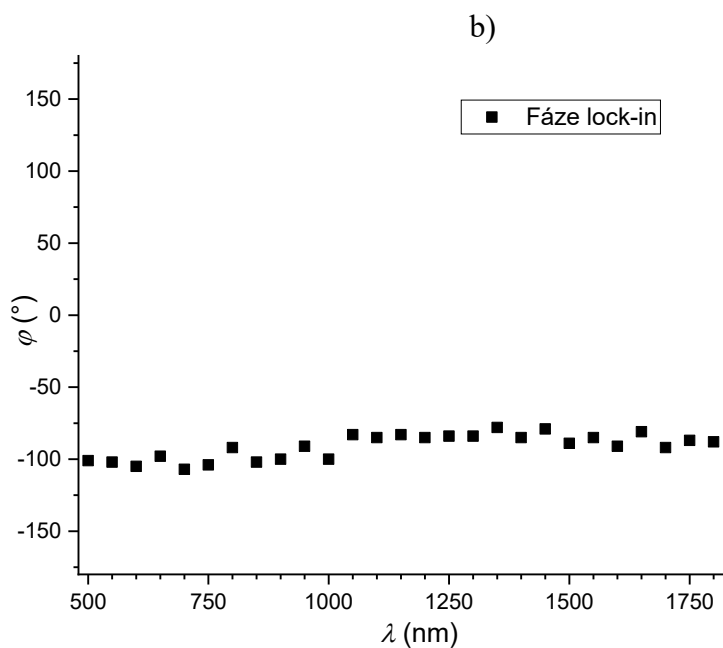
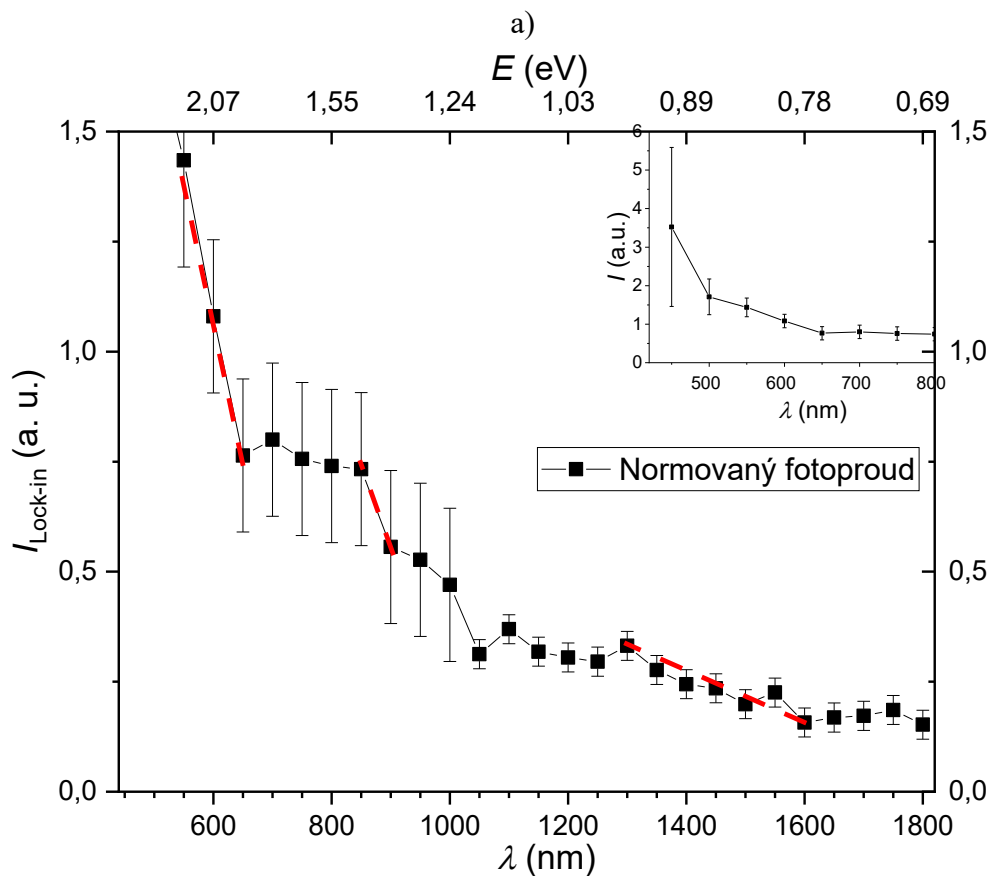
Ve spektrálním měření fotoproudu grafenu (obr. 3.17 a) jsem objevil 3 přechody ovlivňující fotoproud. Nárůst u 1 600 nm odpovídá energii 0,78 eV. Nárůst fotoproudu u mezi 900 a 850 nm odpovídá energii 1,38 - 1,46 eV a nárůst u 600 nm odpovídá energii 2,07 eV. Je potřeba brát v potaz poměrně vysokou chybu vlivem šířky spektra, které je určeno monochromátorem, obr. 2.14. Chyba způsobena šířkou spektra byla určena na 0,05 eV. Nejsem schopen z experimentu určit, zda energie přechodu pochází od valenčního nebo vodivostního pásu. Nárůst fotovodivosti od 1 600 nm (0,78 eV) patrně souvisí s poklesem spektrální propustnosti (obr. 3.16) začínajícím na stejné energii. Pro 6H-SiC byly identifikovány hladiny s aktivační energií 0,765 eV a 0,78 eV [32] související s pastmi tvořenými vanadovou příměsí, která se chová pro zmíněné energie jako akceptor. Dle [32] je pro energii 1,405 eV na Vanadové hladině v 6H-SiC past pro díry, což by mohlo být v souvislosti s nárůstem fotoproudu mezi 1,38 a 1,46 eV. Nicméně hladina nebyla pozorována ve spektrální propustnosti substrátu. Jelikož je šířka zakázaného pásu 6H-SiC 3,02 eV tak 2,07 eV (600 nm) by mohlo být doplňkovou hladinou k 0,95 eV kterou jsem identifikoval jako křemíkovou vakanci [32] viz obr 3.16 E_3 .

Na obr. 3.17 b) je pak zobrazena fáze lock-in zesilovače. Fáze je téměř konstantní, což znamená, že se nemění typ vodivosti v závislosti na vlnové délce světla.

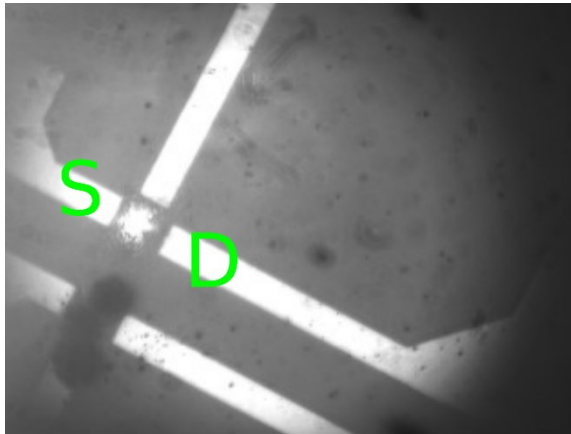
λ (nm)	Q_{foto} (s^{-1})	P (μW)	I ($W \cdot cm^{-2}$)
450	$7,3 \cdot 10^{11}$	0,3	0,2
500	$8,9 \cdot 10^{12}$	4,2	2,4
550	$2,7 \cdot 10^{13}$	11,4	6,5
600-1000	$4,6 \cdot 10^{13}$	15,3*	8,7*
1050-1800	$7,6 \cdot 10^{14}$	144**	81,5**

Tabulka 3.4: Použitý fotonový tok pro měření a jemu odpovídající výkon a intenzita

* pro vlnovou délku 600 nm ** pro vlnovou délku 1050 nm.



Obr. 3.17: a) Závislost fotovodivosti na vlnové délce. Červeně jsou vyznačeny možné optické přechody. Použité fotonové toky jsou uvedeny v tabulce 3.4. b) Fáze lock-in zesilovače během měření v závislosti na vlnové délce světla.



Obr. 3.18: Zobrazení stopy svazku a kontaktů, mezi kterými proběhlo měření.

Dále byla změřena spektrální závislost fotovodivosti s nižší hustotou fotonového toku za použití většího Hall baru. Na stejném vzorku DIM26 proběhlo měření na Hall baru znázorněném na obr. 2.8 b). Hustota fotonového toku byla přibližně o tři řády nižší než u předchozího případu. Použitá aparatura je naznačena na obr. 2.12. Zde nebyl použit objektiv a vzorek byl umístěn hned za chopper – na místo děliče svazků. Zapojení elektrického obvodu je naznačeno na obr. 2.10 b). Měření probíhalo s přiloženým napětím 2 V. Měřicí sériový rezistor měl elektrický odpor 6,8 k Ω . Elektrický odpor vzorku za tmy byl 13 k Ω . Průměr stopy svazku laseru byl 1 mm. Z důvodu spektrálně proměnlivé efektivity zdroje a monochromátoru byl nastaven ve dvou hlavních spektrálních oblastech jiný konstantní fotonový tok. Pro vlnové délky 550 nm a kratší byl výkon světelného zdroje velmi malý, avšak signál na vzorku byl dobře měřitelný. Použitý fotonový tok je zobrazen v tabulce 3.5. Změřená data byla normována podle rovnice 3.4. Fotonový tok mezi 600 a 1000 nm byl použit jako referenční. Měření bylo provedeno při frekvenci 61 Hz.

Oproti předchozímu měření s vyšší hustotou fotonového toku došlo ke změně druhu fotovodivosti z pozitivní fotovodivosti na negativní fotovodivost mezi vlnovými délkami 700 a 750 nm. Na obr 3.20 je zmíněná změna druhu fotovodivosti znázorněna změnou fáze o 180° a poklesem měřeného signálu. Z poklesu elektrického odporu vzorku pro vyšší frekvence záření (obr. 3.21) lze usuzovat pozitivní fotovodivost vzorku od 450 nm po 700 nm a negativní fotovodivost od 750 nm do 1 800 nm. K poklesu měřeného fotoproudu dochází už pro 850 nm, obr. 3.20, podobně dochází k poklesu odporu u 850 nm, obr. 3.21. Lze usuzovat, že jev způsobující změnu typu fotovodivosti se projevuje od 850 nm (1,46 eV), pouze u 700 nm (1,77 eV) převládne nad ostatními jevy ovlivňující fotovodivost.

Podobné chování fotovodivosti bylo změřeno na epitaxním grafenu na 4H-SiC [33]. Autor článku měřil s vlnovými délkami světla 405, 532, 632, 808 a 980 nm pod konstantní intenzitou světla 79,6 mW·cm⁻², za těchto podmínek měřil proud protékajícím vzorkem. Autor uvádí, že pro vlnové délky 405 a 532 nm má jeho vzorek pozitivní fotovodivost a pro 632, 808 a 980 nm má negativní fotovodivost. U

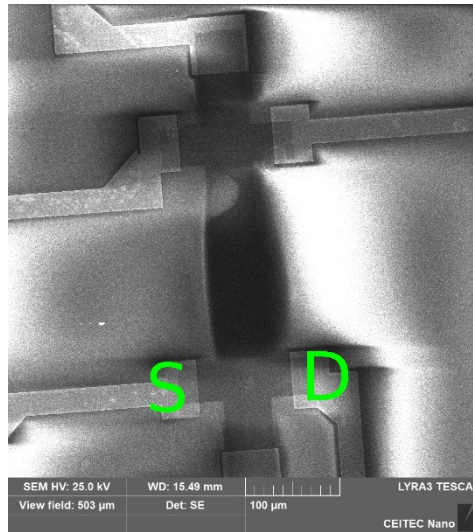
současného měření se znaménko fotovodivosti změnilo u vlnové 750 nm, což se liší od 632 nm popsaných v článku. Rozdíl ve vlnové délce světla, kdy dojde ke změně znaménka fotovodivosti, by mohl být způsoben několika příčinami. Rozdíl v šířce zakázaného pásu 4H-SiC a 6H-SiC je přibližně 0,2 eV a zároveň 4H-SiC a 6H-SiC mají rozdílnou defektní strukturu. Tudíž byl rozdíl pravděpodobně způsoben rozdílnou strukturou substrátu. Dále samozřejmě může mít vliv rozdílná hustota fotonového toku a kvalita grafenu.

Autor [33] vysvětluje chování fotovodivosti tak, že existence buffer layer způsobuje n-dopování grafenu a existenci vnitřního elektrického pole E_B na rozhraní buffer layer a grafenu. To, způsobuje zahnutí pásu nahoru a transport fotonáboje přes rozhraní. Při zasvícení by se měly foto-elektrony transportovat z grafenu do SiC v čase přibližně jednotek fs a světlem generované díry by měly zůstat v grafenu, což by mělo vést k snížení Fermiho meze [33]. Snížení Fermiho meze tak povede ke snížení vodivosti. Zmíněným tvrzením autor vysvětluje snížení vodivosti po osvětlení zdroji s vlnovými délkami 632, 808 a 980 nm. Naopak zvýšení vodivosti po zasvícení 405, 532 nm vysvětluje autor [33] jako důsledek desorpce molekul z vrstvy grafenu a následném zvýšení Fermiho meze, jak je naznačeno na obr. 3.8. I pro vlnové délky světla 405 a 532 nm by mělo docházet k transportu elektronů do substrátu, jev desorpce je pouze silnější [33].

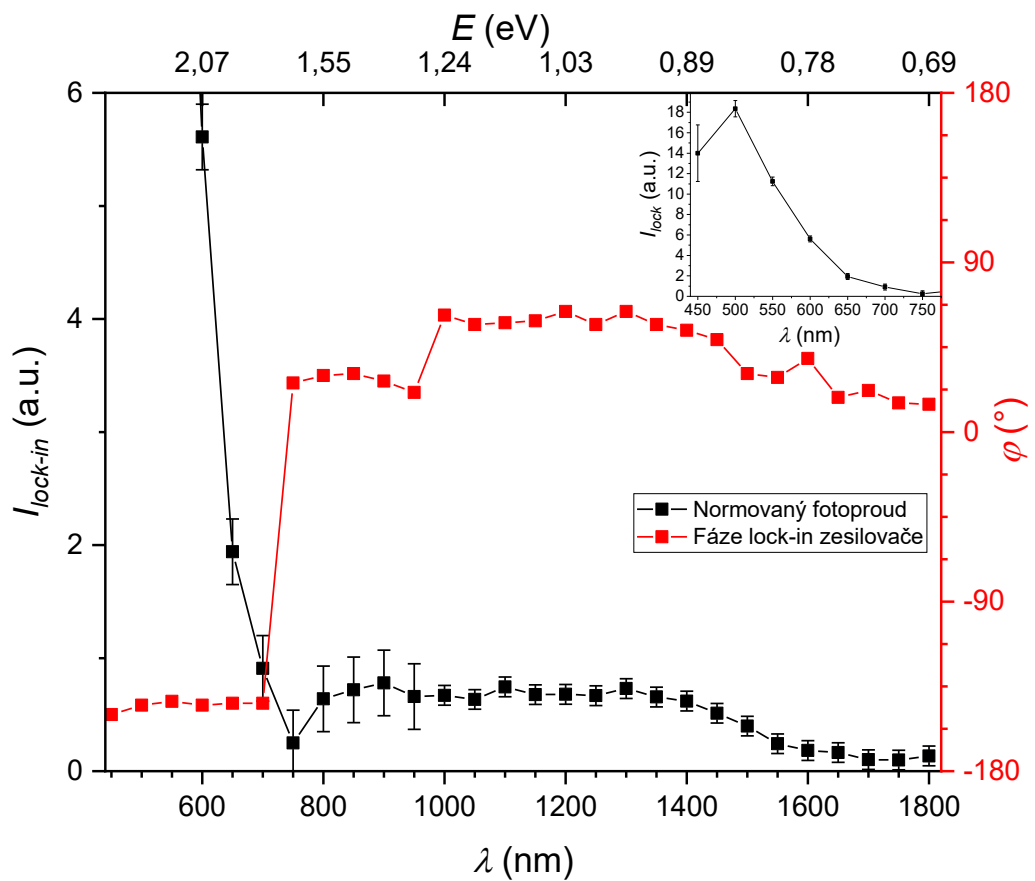
λ (nm)	Q_{foto} (s^{-1})	P (μW)	I ($mW \cdot cm^{-2}$)
450	$9,2 \cdot 10^{12}$	4	0,4
500	$7,4 \cdot 10^{13}$	29	2,9
550	$2,2 \cdot 10^{14}$	78	7,8
600-950	$4,0 \cdot 10^{14}$	133*	13,3*
1000-1800	$3,1 \cdot 10^{15}$	578**	57,8**

Tabulka 3.5: Použitý fotonový tok pro měření a jemu odpovídající výkon a intenzita.

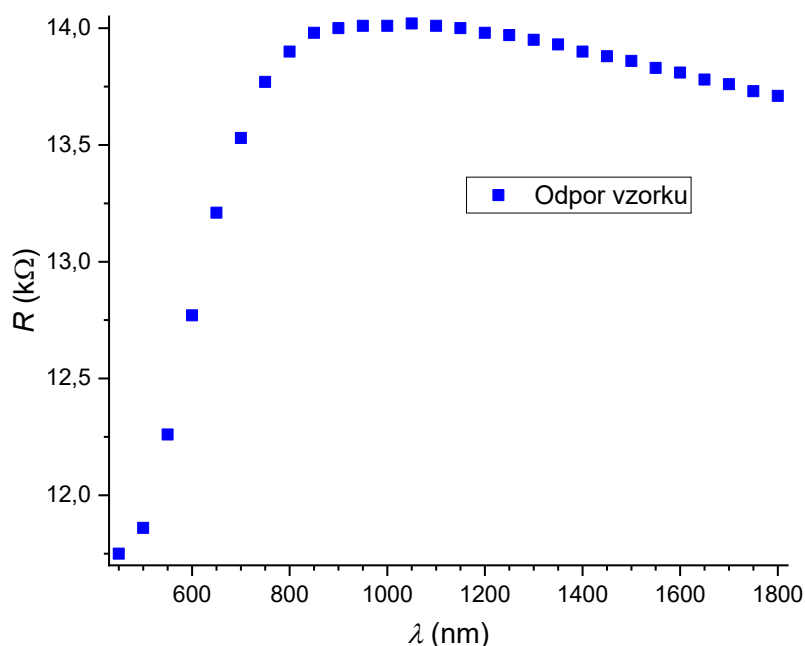
* pro vlnovou délku 600 nm ** pro vlnovou délku 1050 nm.



Obr. 3.19: Zobrazení kontaktů, mezi kterými bylo provedeno měření.



Obr. 3.20: Fotovodivostní spektrum a fáze na lock-in zesilovači změřené na větším z Hall barů.



Obr. 3.21: Odpor vzorku v závislosti na vlnové délce světla.

3.4. Porovnání a diskuse výsledků

Pomocí měření v rozdílném prostředí, konkrétně v jenném vakuu (2 Pa) a atmosférickém tlaku ve vzduchu (obr. 3.1), byl ukázán vliv adsorbovaných molekul na elektrický odpor vzorku tím, že jeho odpor poklesl o více než polovinu po desorpci molekul z povrchu vzorku. Dále bylo na stejném grafu demonstrováno, že dochází k desorpci molekul z povrchu během měření v použité aparatuře pouze vlivem svícení světla. Bylo to demonstrováno na prvních 15 hodinách měření v jenném vakuu, kde ačkoliv byl vzorek v jenném vakuu (2 Pa), nedocházelo k poklesu elektrického odporu. K poklesu elektrického odporu a desorpci molekul z povrchu vzorku došlo až po ozáření vzorku UV světlem.

Nejpoužívanější metodou, jak se zbavit z povrchu adsorbované vody z aparatury, je pomocí nahřátí aparatury na teplotu několik set stupňů ve vysokém vakuu. Například při testování adsorpce různých plynů na vodivost grafenu bylo použito [19] nahřátí vzorku na 150 °C ve vakuu pro desorpci molekul z povrchu. Jelikož měření neproběhlo v ultra vakuu, ale v nízkém vakuu při tlaku přibližně 2 Pa, tak celá aparatura byla pokrytá tenkou vrstvou adsorbované vody. Například SiO₂ je běžně pokryt 2 až 3 nm vrstvou vody [34] za běžného atmosférického tlaku. V případě nízkého tlaku je SiO₂ pokryto vrstvou 0,7 nm vody při tlaku 10⁻⁴ až 10³ Pa [34].

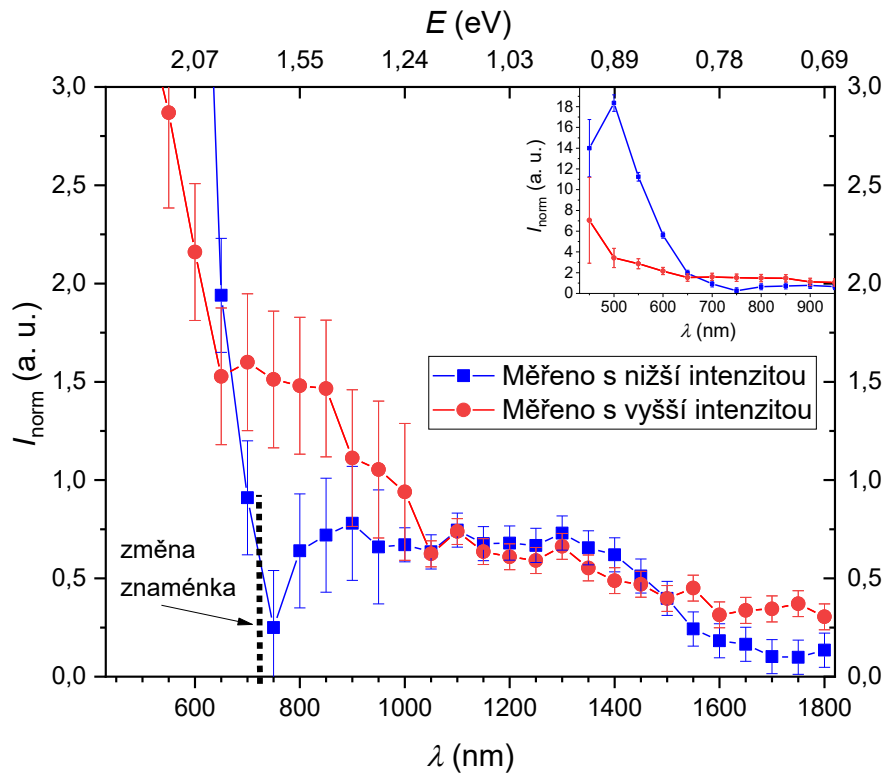
Lze usuzovat, že dominantní vliv na časový vývoj elektrického odporu vzorku měřeného na vzduchu i v jenném vakuu měla adsorpce a desorpce molekul na vzorek z atmosféry a stěn kryostatů.

Dále se ukázalo, že adsorpce molekul na povrchu vzorku má vliv na fotoproud měřený pomocí lock-in zesilovače, zobrazeno na obr. 3.5, kde se vlivem adsorbovaných molekul výrazně liší měřený signál. V případě podgapového světla může být měřený fotoproud více ovlivněn adsorpcí a desorpcí molekul z povrchu než samotnou absorpcí světla ve vrstvě grafenu a substrátu SiC [33], což pak může ovlivnit měření fotovodivostního spektra, které bude více ovlivněno adsorpcí a desorpcí molekul z povrchu než existencí hladin v zakázaném páse. K Stabilizaci elektrických vlastností epitaxního grafenu by mohla pomoci pasivace povrchu například pomocí SiO₂ [18].

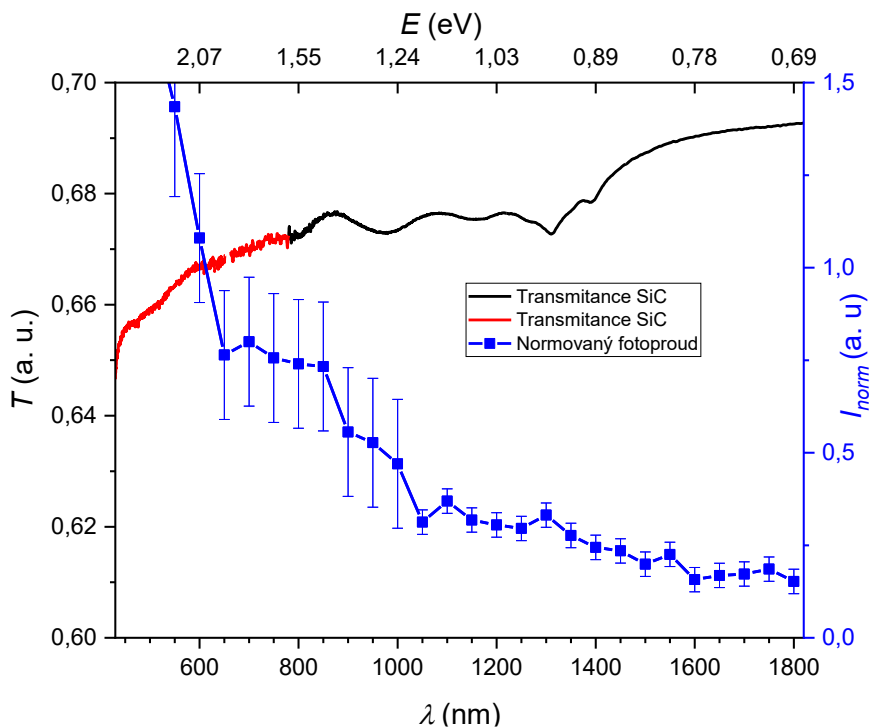
Proběhlo měření dvou spektrálních závislostí fotovodivosti pro rozdílné hustoty fotonového toku. V případě měření s nižší intenzitou došlo ke změně fotovodivosti z pozitivní na negativní. Naopak při vysoké intenzitě svícení byl typ fotovodivosti stejný bez ohledu na vlnovou délku. Obě závislosti fotovodivosti jsou zaneseny do jednoho grafu na obr. 3.22. Spektra zde jsou normována na podobné hodnoty fotoproudu. Spektra pro delší vlnové délky spolu korelují. Pro kratší vlnové délky, kde se začne projevovat desorpce molekul z povrchu po zasnícení, se u spektra s nižší hustotou fotonového toku změnil druh fotovodivosti. Hlavním procesem ovlivňující fotovodivost se stane desorpce molekul z povrchu. U spektra s vyšší hustotou fotonového toku se během měření nemění fotovodivost z pozitivní na negativní (obr. 3.17), a to vlivem o tři řády větší hustoty fotonového toku a zároveň 14krát menší plochy grafenu mezi kontakty, kde by se mohly adsorbovat molekuly.

Ze zmíněného důvodu bylo porovnáno transmitanční spektrum substrátu SiC se spektrální závislostí fotovodivosti pro vyšší hustotu fotonového toku, obr. 3.23. Pro vyšší vlnové délky spektrum antikoreluje se spektrem optické propustnosti. Ve fotovodivostním spektru je vidět skok ve vodivosti mezi hodnotami 900 nm a 850 nm (1,38-1,45 eV) a mezi 650 nm a 600 nm (1,91-2,07 eV). Dle [32] je pro energii 1,405 eV na Vanadové hladině v 6H-SiC past pro díry, což by mohlo být v souvislosti s nárůstem fotovodivosti mezi energiemi 1,38-1,45 eV. Změna fotoproudu mezi energiemi 1,91-2,07 eV by mohla souviset, vezmu-li v úvahu šířku zakázaného pásu 3,02 eV, s hladinou o energii 0,95 eV (obr. 3.16 E_3) excitovanou z opačného pásu, kterou jsem identifikoval jako křemíkovou vakanci.

Na základě provedených experimentů zde nelze zcela rozhodnout, zda ke změnám proudu v grafenu došlo vlivem signifikantní změny profilu elektrického pole, nebo injekcí fotogenerovaného náboje ze substrátu do grafenu. Měření spektrální závislosti fotoproudu, a zejména měření fotoproudu v jemném vakuu (2 Pa) pomocí lock-in zesilovače (obr. 3.5), dává potenciál na ovládání vodivosti grafenu světlem skrz hladiny v zakázaném páse, respektive přes mezipásovou absorpci.



Obr. 3.22: Porovnání fotovodivostního spektra pro dvě různé hustoty fotonového toku na 2 různých Hall barech, hodnoty jsou nanormované. Pro měření s vyšší hustotou fotonového toku byl použit Hall bar, který je zobrazen na obr. 2.8 a). Pro měření s nižší hustotou fotonového toku byl použit Hall bar, který je zobrazen na obr. 2.8 b).



Obr. 3.23: Porovnání propustnosti substrátu s fotovodivostním spektrem pro případ měření s vyšší intenzitou.

4. Závěr

Pro práci byly připraveny vzorky pro měření odezvy testovacích součástek epitaxního grafenu na osvětlení. Vzorky byly připraveny jak pomocí ručně připravených kontaktů, tak pomocí elektronové litografie, kde byla optimalizována příprava. Byla změřena časová dynamika změny vodivosti grafenu v okolní atmosféře vzduchu a v jenném vakuu. Byl zjištěn značný rozdíl elektrického odporu vzorku v závislosti na vnější atmosféře vlivem adsorpce. Byl zjištěn značný vliv adsorpce molekul na měřený fotoproud pomocí lock-in zesilovače, který je v jenném vakuu více než dvojnásobný oproti měření na vzduchu.

Byla změřená frekvenční závislost fotoodezvy grafenu a závislost proudu na světelném výkonu. U frekvenční závislosti byla pozorována proudová odezva do 2 kHz, omezena pouze odezvou zdroje záření. Jelikož nebyl pozorován výrazný pokles odezvy fotoproudu s rostoucí frekvencí, což dává potenciál optickému hradlování být funkční i pro vyšší frekvence. Byla pozorována v logaritmickém měřítku sublineární závislost se směrnicí 0,6 v závislosti na světelném výkonu, způsobena akumulací náboje na rozhraní grafen SiC, nebo vlivem adsorpce a desorpce molekul na povrchu.

Byla změřena spektrální propustnost substrátu, ze které byly pomocí rešerše identifikovány možné bodové defekty ovlivňující absorpci podgapového světla. Byla změřena spektrální závislost fotovodivosti pro dvě o několik řádů rozdílné hustoty fotonového toku. Pro nižší hustotu fotonového toku byla zjištěna změna typu fotovodivosti u 750 nm související s adsorpcí molekul na povrchu grafenu. U měření s vyšší hustotou fotonového toku byly nalezeny optické přechody související se změnou fotovodivosti epitaxního grafenu. Měření bylo porovnáno se spektrální optickou propustností substrátu SiC. Byla potvrzená odezva na optické hradlování epitaxního grafenu v širokém spektrálním oboru od 365 nm až po 1,8 μm . Epitaxní grafen má potenciál být funkčním materiálem pro optické hradlování v případě provedení optimalizačních kroků při přípravě.

Pro elektronické a fotonické aplikace by bylo vhodné epitaxní grafen pasivovat pomocí oxidů pro potlačení vlivu adsorpce molekul z prostředí. Dále by bylo zajímavé v budoucnu zkoumat vlastnosti quasi free standing grafenu, který není přes buffer layer vázán k substrátu.

5. Literatura

- [1] GEMMA, Rius a Philippe GODIGNON. *Epitaxial Graphene on Silicon Carbide Modeling, Characterization, and Applications*. 2018.
- [2] SYVÄJÄRVI, M., R. YAKIMOVA a E. JANZÉN. *Interfacial Properties in Liquid Phase Growth of SiC*. The Electrochemical Society, 1999, (146).
- [3] HARRIS, R. *Oxidation of 6H- α Silicon Carbide Platelets*. Journal of the American Ceramic Society, 1975, (58).
- [4] KHAN, F. a I. ADESIDA. High rate etching of SiC using inductively coupled plasma reactive ion etching in SF₆-based gas mixtures. *Appl. Phys. Lett.* 1999, (75).
- [5] CARVILL, J. *Mechanical Engineer's Data Handbook*. 1994.
- [6] BICKERMANN, M., B. EPELBAUM, D. HOFMANN, T. STRAUBINGER, R. WEINGARTNER a A. WINNACKER. Incorporation of boron and vanadium during PVT growth of 6H-SiC crystals. *Journal of Crystal Growth*. 2001, (233).
- [7] TSUNENOBU, Kimoto a James COOPER. *Fundamentals of Silicon Carbide Technology, Growth, Characterization, Device, and Application*. 2014.
- [8] WANG, S., M. ZHAN, G. WANG et al. *4H-SiC: A new nonlinear material for midinfrared lasers*. Laser Photonics Rev., 2013, (7).
- [9] NORIMATSU, Wataru a Michiko KUSUNOKI. Epitaxial graphene on SiC{0001}: advances and perspectives. *Physical chemistry chemical physics*. 2014, (16).
- [10] CASTRO, Neto, F. GUINEA, N. PERES, K. S. NOVOSELOV a A. GEIM. The electronic properties of graphene. *Reviews of Modern Physics*. 2009, (81).
- [11] OUERGHI, A., R. BELKHOUCHE, M. MARANGOLO et al. *Structural coherency of epitaxial graphene on 3C-SiC(111) epilayers on Si(111)*. Appl. Phys. Lett., 2010, (97).
- [12] VIROJANADARA, C., M. SYVÄJÄRVI, R. YAKIMOVA, L. JOHANSSON, A. ZAKHAROV a T. BALASUBRAMANIAN. *Homogeneous large-area graphene layer growth on 6H-SiC(0001)*. Phys. Rev. B, 2008, (78).
- [13] EMERY, Jonathan, D. WHEELER, J. JOHNS, M. MCBRIARTY, B. DETLEFS, M. HERSAM, K. GASKILL a M. BEDZYK. *Structural*

- consequences of hydrogen intercalation of epitaxial graphene on SiC(0001).* Applied Physics Letters, 2014, (105).
- [14] VIROJANADARA, C., S. WATCHARINYANON, A. ZAKHAROV a L. JOHANSSON. *Epitaxial graphene on 6H-SiC and Li intercalation.* PHYSICAL REVIEW B, 2010, (82).
- [15] XIA, C., S. WATCHARINYANON, A. A. ZAKHAROV, L. JOHANSSON, R. YAKIMOVA a C. VIROJANADARA. *Detailed studies of Na intercalation on furnace-grown graphene on 6H-SiC(0001).* Surface Science, 2013, (613).
- [16] XIA, C., S. WATCHARINYANON, A. ZAKHAROV, R. YAKIMOVA, L. HULTMAN, L. JOHANSSON a C. VIROJANADARA. *Si intercalation/deintercalation of graphene on 6H-SiC(0001).* Phys. Rev. B, 2012, (85).
- [17] MAMMADOV, Samir, J RISTEIN, J KRONE, C RAIDEL, M WANKE a V WIESMANN. *Work function of graphene multilayers on SiC(0001).* 2D Materials. 2017, (4).
- [18] KALKAN, S., H. AYDIN, D. ÖZKENDIR a C. ÇELEBI. *The effect of adsorbates on the electrical stability of graphene studied by transient photocurrent spectroscopy.* Appl. Phys. Lett., 2018, (112).
- [19] SCHEDIN, F., A. GEIM, S. MOROZOV, E. HILL, P. BLAKE, M. KATSNELSON a K. NOVOSELOV. *Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene.* Nature Materials, 2007, (6).
- [20] KALKAN, Sırrı, A. YANILMAZ a C. ÇELEBI. *Impact of encapsulation method on the adsorbate induced electrical instability of monolayer graphene.* Journal of Vacuum Science & Technology A, 2019, (37).
- [21] YOON, Joong, H. JUN, J. YANG, Z. ZHOU, S. YANG a M. CHENG. *Carbon dioxide gas sensor using a graphene sheet.* Sensors and Actuators B: Chemical. 2010, (157).
- [22] YANG, Yinxiao a Raghu MURALI. *Binding mechanisms of molecular oxygen and moisture to graphene.* Appl. Phys. Lett., 2011, (98).
- [23] ALLRESIST. *Informace k serii fotorezistů AR-P 610* [online]. [cit. 2022]. Dostupné z: https://www.allresist.com/wp-content/uploads/sites/2/2021/02/Allresist_Product-information-E-Beamresist-AR-P-610-English-web.pdf
- [24] ALLRESIST. *Informace k serii fotorezistů AR-P 630 - 670* [online]. [cit. 2022]. Dostupné z: <https://www.allresist.com/wp->

content/uploads/sites/2/2015/12/allresist_produkinfos_ar-p630-670_englisch.pdf

- [25] ALLRESIST. *Informace k serii fotorezistů AR-N 7520 new series* [online]. [cit. 2022]. Dostupné z: <https://www.allresist.com/portfolio-item/e-beam-resist-ar-n-7520-new-series/>
- [26] NKT PHOTONICS. [cit. 2022]. Dostupné z: <https://www.nktphotonics.com/products/supercontinuum-white-light-lasers/superk-compact/>
- [27] JÖRGER , M. a G. ZACHMANN. THE NEW VACUUM FT-IR SPECTROMETER: DESIGN ADVANCES AND RESEARCH APPLICATIONDESIGN. In: *WIRMS 2007*. Awaji Island, Japonsko, 2007.
- [28] KELKAR, K., N. ISLAM, P. KIREWANICH, C. FESSLAR a W. NUNNALLY. ON-State Characteristics of a High-Power Photoconductive Switch Fabricated From Compensated 6-H Silicon Carbide. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2008, (36).
- [29] NUNNALLY, William a Kenneth MCDONALD. Silicon Carbide photoconductive switch results using commercially available material. *IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference*. 2010.
- [30] NAIR, R., P. BLAKE, A. GRIGORENKO, K. NOVOSELOV, T. BOOTH, T. STAUBER, N. PERES a A. GEIM. *Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene*. *Science*, 2008, (320).
- [31] MITCHEL, W., W. MITCHELL, G. LANDIS a H. SMITH. *Vanadium donor and acceptor levels in semi-insulating 4H- and 6H-SiC*. *J. Appl. Phys.*, 2006, (101).
- [32] KAMIŃSKI, Paweł, R. KOZIŃOWSKI, M MICZUGA, M. PAWŁOWSKI, M. KOZUBAL a M. PAWŁOWSKI. *High-resolution photoinduced transient spectroscopy of defect centers in vanadium-doped semi-insulating SiC*. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2008, (19).
- [33] RATHORE, Shivi, Dinesh PATEL, Mukesh THAKUR et al. *Highly sensitive broadband binary photoresponse in gateless epitaxial graphene on 4H-SiC*. *Carbon*, 2021, (184).
- [34] OPITZ, A., M. SCHERGE a I. AHMED. A comparative investigation of thickness measurements of ultra-thin water films by scanning probe techniques. *J. Appl. Phys.* 2007, (101).

Seznám obrázků

1.1	Zobrazení různých polytypů SiC, vlevo tři možné pozice pro skládání dvojvrstev, dále pak sekvence vrstev pro jednotlivé polytypy, převzato z [1]	1
1.2	Zobrazení rozdílu mezi Si- a C- stranou krystalu SiC, převzato z [1]	2
1.3	Zobrazení krystalografické mřížky 6H-SiC, převzato z [9].....	3
1.4	Pásová struktura grafenu. Zvýrazněná část zobrazuje Diracův kužel, převzato z [10].....	3
1.5	Růst epitaxního grafenu, modře atomy uhlíku, červeně atomy křemíku, převzato z [9].....	4
1.6	Rozdíl v růstu grafenu mezi Si-stranou SiC na které narostl několikavrstvý grafen (FLG) a C-stranou s multivrstvou grafenu (MLG). Červeně křemík, modře uhlík, přerušovanou čarou je zobrazená buffer layer. Převzato z [9].....	4
1.7	Interkalace grafenu, převzato z [13].....	5
1.8	a) Závislost výstupní práce grafenu na počtu vrstev, červeně epitaxní grafen, modře quasi free standing grafen, HOPG označuje vysoce orientovaný pyrolytický grafit. Černé symboly označují vzdálenost Dirakova bodu od Fermiho hladiny, převzato z [17] b) Naznačení vlivu výstupní práce na typ vodivosti grafenu.....	5
2.1	Ramanova spektroskopie grafenu na vzorku D1M26. a) zobrazení Ramanových spekter měřených na několika místech vzorku b) detail 2D vrcholu, s šířkou v polovině maxima 32 až 35 cm^{-1}	7
2.2	Vzorek D1M1 1) spodní celoplošný kontakt 2) kontakty source a drain.	8
2.3	Vzorek D1 tvořený pouze substrátem bez grafenu. Vzorek D1 má stejnou konfiguraci kontaktů jako vzorek D1M1.	8
2.4	Naznačení procesu elektronové litografie. a) nanosení fotorezistu b) vypečení fotorezistu při předepsané teplotě c) ozáření fotorezistu elektronovým svazkem d) vyvolání fotorezistu e) napaření kovu nebo leptání f) odstranění fotorezistu, převzato z [24].	10
2.5	Části vzorku vytvořených v jednotlivých krocích litografie. 1) vyleptání grafenu pod kontakty a napaření kontaktů, 2) Napaření přívodních kontaktů k Hall barům 3) Zakrytí Hall baru pomocí negativního fotorezistu a následné vyleptání okolního grafenu.....	11
2.6	Význam rozměrů uvedených v tabulce 2.1	11
2.7	Fotografie vzorků po kontaktování a) vzorek D1M26 b) vzorek D5M62	12
2.8	Detail vzorku D1M26	13
2.9	Detail vzorku D5M62. Na Hall baru b) si lze všimnout zbytku napařeného kovu, který se nepodařilo odstranit při smývání fotorezistu	14
2.10	Použitá zapojení obvodu pro měření. Červeně je naznačen substrát, černě vrstva grafenu, žlutě spodní kontakt pro hradlování.....	16
2.11	Aparatura pro měření vzorku D1M1	17
2.12	Aparatura pro měření vzorku D1M26 a D5M62	17
2.13	Výkonové spektrum laseru SuperK COMPACT převzato z [26].....	17

2.14	Ukázka kvazimonochromatického světla z monochromátoru	18
2.15	Schéma Fourierivského spektrometru Bruker Vertex 80v, převzato z [27]....	19
3.1	a) Vliv adsorpce a desorpce na elektrický odpor vzorku. Čas na ose x je uveden v hodinách, on/off značí, zda je vzorek osvětlen, nebo je vzorek ve tmě. b) zobrazení zapojení elektrického obvodu pro měření	21
3.2	Časová závislost elektrického odporu vzorku v atmosféře vzduchu a v jemném vakuu a) zobrazení dvou cyklů měření b) zobrazení elektrického obvodu c) zobrazení fitu dat v atmosféře vzduchu d) zobrazení fitu v jemném vakuu.....	23
3.3	Zobrazení obvodu pro měření, která jsou zobrazena na obrázcích 3.4-3.9.....	24
3.4	Časová závislost odporu vzorku D1M1 v jemném vakuu a v atmosféře vzduchu. V čase t_1 začala evakuace kryostatu. Časy t_2 na sebe navazují. V čase t_3 byl kryostat napuštěn vzduchem	25
3.5	Závislost signálu lock-in zesilovače na elektrickém odporu vzorku v jemném vakuu a v atmosféře vzduchu. Zvýrazněné časy t_1 až t_4 odpovídají bodům na obr. 3.4.	25
3.6	Časová závislost elektrického odporu vzorku D1M1 v jemném vakuu (2 Pa) a v argonu.....	26
3.7	Závislost signálu lock-in zesilovače na elektrickém odporu vzorku v jemném vakuu (2 Pa) a v atmosféře argonu. V grafu je vyznačeno místo znázorňující měřený fotoproud po 6 hodinách od napuštění kryostatu argonem.	27
3.8	Vliv adsorpce na Fermiho mez vzorku	27
3.9	Normalizovaná odezva v závislosti na frekvenci svícení	28
3.10	Obvod pro měření výkonnostní závislosti zobrazené na obr. 3.11.	30
3.11	Výkonová závislost vzorku D1M1 s grafenem a substrátu D1 bez grafenu. Hodnoty pro substrát D1 jsou vyděleny 20. Horní vodorovná osa zobrazuje fotonový tok.....	30
3.12	Naznačení průběhu elektrického pole mezi elektrodami. (1) bez prostorového náboje, (2)-(5) s prostorovým nábojem, plocha pod křivkami je vždy konstantní. ...	31
3.13	Zobrazení elektrických obvodů pro měření zobrazeno obr. 3.14.....	32
3.14	Závislost proudu měřená pomocí lock-in zesilovače na výkonu laseru. Černě znázorněná data odpovídají zapojení obvodu na obr. 3.13 a) předpokládaný tok proudu je naznačen na obr. 3.15 a). Červeně znázorněná data odpovídají zapojení obvodu na obr. 3.13 b) předpokládaný tok proudu je naznačen na obr. 3.15 b). Modře znázorněná data odpovídá zapojení obvodu na obr. 3.13 c) předpokládaný tok proudu je naznačen na obr. 3.15 c).	33
3.15	Naznačení toku proudu přes vzorek pro jednotlivá zapojení obvodu. a) předpokládám tok proudu pouze přes vrstvu grafenu. b) fotoproud I_G teče mezi spodním hradlovacím kontaktem a horním grafenovým. Část proudu odtéká spolu s proudem I_{sd} (I_{G2}), část proudu snižuje příchozí proud I_{sd} (I_{G1}). c) Není připojen zdroj mezi kontakty source drain a proud teče pouze od hradla směrem ke grafenové vrstvě.	33
3.16:	Spektrální optická propustnost substrátu 6H-SiC měřena dvěma různými detektory.....	35

3.17	Závislost fotovodivosti na vlnové délce. Červeně jsou vyznačeny možné optické přechody. Použité fotonové toky jsou uvedeny v tabulce 3.4. b) Fáze lock-in zesilovače během měření v závislosti na vlnové délce světla.....	37
3.18	Zobrazení stopy svazku a kontaktů, mezi kterými proběhlo měření	38
3.19	Zobrazení kontaktů, mezi kterými bylo provedeno měření	40
3.20	Fotovodivostní spektrum a fáze na lock-in zesilovači změřené na větším z Hall barů.....	40
3.21	Odpor vzorku v závislosti na vlnové délce světla.....	41
3.22	Porovnání fotovodivostního spektra pro dvě různé hustoty fotonového toku na 2 různých Hall barech, hodnoty jsou nanormované. Pro měření s vyšší hustotou fotonového toku byl použit Hall bar, který je zobrazen na obr. 2.8 a). Pro měření s nižší hustotou fotonového toku byl použit Hall bar, který je zobrazen na obr. 2.8 b).....	43
3.23	Porovnání propustnosti substrátu s fotovodivostním spektrem pro případ měření s vyšší intenzitou.....	43

Seznam tabulek

2.1	Rozměry Hall barů. l_p vzdálenost kontaktů podélně, l_s vzdálenost kontaktů příčně, w šířka vodivého grafenového kanálu viz obr. 2.6. Písmena a, b, c, d odpovídají jednotlivým Hall barům uvedených na obrázcích 2.8, 2.9.....	11
3.1	Časové konstanty získané fitováním trojitou exponenciálou z měření, které je zobrazeno na obr. 3.1.	22
3.2	Průměr hodnot časových konstant získaných fitováním dvojitou exponenciálou z měření, které je zobrazeno na obr. 3.2	22
3.3	Identifikované hladiny tvořené příměsemi a defekty nalezené pomocí měření spektrální propustnosti, které je zobrazeného na obr. 3.16.....	34
3.4	Použitý fotonový tok pro měření a jemu odpovídající výkon a intenzita * pro vlnovou délku 600 nm ** pro vlnovou délku 1050 nm	36
3.5	Použitý fotonový tok pro měření a jemu odpovídající výkon a intenzita. * pro vlnovou délku 600 nm ** pro vlnovou délku 1050 nm.	39