

## I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Název práce:	Atomic Layer Deposition
Jméno autora:	Karolína Veselá
Typ práce:	bakalářská
Fakulta/ústav:	Fakulta elektrotechnická (FEL)
Katedra/ústav:	Katedra mikroelektroniky
Oponent práce:	Doc. Ing. Ladislav Kalvoda, CSc.
Pracoviště oponenta práce:	FJFI ČVUT v Praze, Katedra inženýrství pevných látek

## II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

Zadání	náročnější
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
Práce je věnována zevrubnému popisu principu, konstrukce a základních aplikací metody ALD (atomic layer deposition, dpozice atomových vrstev), především ve vztahu k přípravě struktur s využitím v mikroelektronických součástkách a zařízeních.	
Zadané úkoly zahrnují následující tři body: (i) principy růstu vrstev pomocí ALD a jejich konkrétními aplikace v elektronice, (ii) popis parametrů a obsluhy ALD systému od firmy Sentech a (iii) realizace růstu testovací tenké oxidové vrstvy a její charakterizace pomocí optické mikroskopie a mikroskopie atomárních sil (AFM, atomic force microscopy).	
Vzhledem k charakteru funkční podstaty a konkrétní technické implementace depoziční metody ALD se jedná jednoznačně o náročnější interdisciplinární téma, zahrnující aspekty fyzikální, chemické, softwarové a technické.	

Splnění zadání	splněno
<i>Posuďte, zda předložená závěrečná práce splňuje zadání. V komentáři případně uveďte body zadání, které nebyly zcela splněny, nebo zda je práce oproti zadání rozšířena. Nebylo-li zadání zcela splněno, pokuste se posoudit závažnost, dopady a případně i příčiny jednotlivých nedostatků.</i>	
Úkoly stanovené v zadání práce byly v plném rozsahu splněny. Nad rámec zadání byla provedena příprava a charakterizace čtyř vzorků kapacitních struktur o složení Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al, a dále, kromě optické mikroskopie a AFM využita též metoda Ramanovy spektroskopie k charakterizaci připravených vrstev.	

Zvolený postup řešení	vynikající
<i>Posuďte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.</i>	
Bakalantka si osvojila všechny znalosti a postupy nutné k úspěšné realizaci stanovených experimentů a základní interpretaci dosažených výsledků a úspěšně je aplikovala. Zatímco charakterizace tenkých vrstev Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> a SiO <sub>2</sub> poskytla očekávané hodnoty tloušťky a střední povrchové nerovnosti, připravené kapacitní struktury nevykázaly očekávané chování zřejmě v důsledku strukturních změn, které by vyžadovaly podrobnější analýzu. Tento negativní výsledek však nesnižuje celkovou adekvátnost a vysokou úroveň zvolených postupů a metod.	

Odborná úroveň	A - výborně
<i>Posuďte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.</i>	
Práce má výbornou odbornou úroveň. Studentka se velmi úspěšně vyrovnala se zpracováním řady nových poznatků týkajících se metody ALD a analytických technik využitých k charakterizaci připravených struktur, přičemž využila řady zdrojů zahrnujících monografie, původní vědecké články, technické manuály a reference k použitému ALF systému SENTECH, a též aktuální webové odkazy.	

Formální a jazyková úroveň, rozsah práce	A - výborně
<i>Posuďte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posuďte typografickou a jazykovou stránku.</i>	
Práce o rozsahu 42 číslovaných je psána v anglickém jazyce, na výborné stylistické a jazykové úrovni, s pečlivou typografickou úpravou. Počet překlepů je opravdu minimální, dva případy ovlivňující význam textu jsou spolu s několika doplňujícími dotazy zmíněny níže v části III. posudku.	

**Výběr zdrojů, korektnost citací**

**A - výborně**

*Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posuďte, zda student využil všechny relevantní zdroje. Ověřte, zda jsou všechny převzaté prvky řádně odlišeny od vlastních výsledků a úvah, zda nedošlo k porušení citační etiky a zda jsou bibliografické citace úplné a v souladu s citačními zvyklostmi a normami.*

Přehled použité literatury zahrnuje celkem 28 referencí použitých v textu. Výběr zdrojů navazuje na literaturu doporučenou v zadání práce, je časově aktuální a pokrývá adekvátně hlavní tématické oblasti práce. Po formální stránce jsou bibliografické informace uváděny v souladu s citačními zvyklostmi, drobným nedostatkem je absence místa vydání v případě odkazů na monografie, jednoznačnost citace je však v těchto případech zaručena uvedením kódu ISBN.

**Další komentáře a hodnocení**

*Vyjádřete se k úrovni dosažených hlavních výsledků závěrečné práce, např. k úrovni teoretických výsledků, nebo k úrovni a funkčnosti technického nebo programového vytvořeného řešení, publikačním výstupům, experimentální zručnosti apod.*

Vložte komentář (nepovinné hodnocení).

**III. CELKOVÉ HODNOCENÍ, OTÁZKY K OBHAJOBĚ, NÁVRH KLASIFIKACE**

*Shrňte aspekty závěrečné práce, které nejvíce ovlivnily Vaše celkové hodnocení. Uveďte případné otázky, které by měl student zodpovědět při obhajobě závěrečné práce před komisí.*

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **A - výborně**.

I přes omezení vyvolaná pandemickou situací dokázala autorka úspěšně naplnit a dokonce překročit zadaný rozsah experimentální části práce a získat základní testovací výsledky na nově instalované aparatuře ALD SENTECH SI PEALD LL.

V rámci obhajoby bych autorku rád požádal o zodpovězení následujících dotazů:

1. Na str. 4, odst. 2, je u zkratky prekursoru TMA uveden chemický název: „trimethylamin“. Je tento název správný?
2. Na str. 8 jsou charakterizovány vlastnosti jednotlivých skupin organometalických prekursorů. Pro případ alifatických ligandů se uvádí: „(alkyls) are not as well thermally stable, and their decomposition at higher temperatures is limited“. Je poslední uvedená vlastnost míněna jako přednost či jako negativum?
3. Na str. 14 jsou v popisku pod obrázkem 3.3 a v první větě následujícího odstavce uvedeny dříve v textu nezavedené zkratky „HfAlO“ respektive „HfALO“. Jaký je jejich význam?
4. V odst. 4.3.4 je podán popis „Real time monitoru (RTM)“ sloužícího k in-situ monitorování růstu vrstvy metodou optické elipsometrie. Je známo, že pozorované změny elipsometrických koeficientů závisí na spektrální disperzi indexu lomu rostoucí vrstvy. Na kolika vlnových délkách pracuje použitý RTM a proč je obecně výhodné využití více vlnových délek?
5. Na str. 29 se v rámci popisu AFM módu pracujícího s vibrujícím hrotem uvádí: „By moving the tip across the sample, the atom at the apex of the tip reacts with individual atoms on the surface and forms chemical bonds with them.“ Dochází v uvedeném případě skutečně k tvorbě chemické vazby?
6. Na str. 30 jsou diskutovány výsledky analýzy vrstvy SiO<sub>2</sub> a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> porovnané s výchozím Si waferem provedené metodou Ramanovy spektroskopie, shrnuté do závěru: „Raman spectroscopy verified that the samples were unperturbed, and no damage was done to them.“ Mohla by autorka blíže objasnit toto tvrzení?
7. Na str. 35 je zjevně překlep v hodnotě výsledku plochy S vypočtené pro kapacitor s tloušťkou dielektrické Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vrstvy 20 nm:  $7 \times 10^{-10}$  m. Jaká je správná hodnota?

Datum: 7.6.2021

Podpis: