2 層電子線レジストによる極微細加工用レジストプロセス 長岡 史郎* 水澤 崇** 田中 友樹*** 敖 金平**** 大野 泰夫****

Ultra High Resolution EB Lithography Process Using Bi-layer Resist

Shiro NAGAOKA, Takashi MIZUSAWA, Tomoki TANAKA, Jin-Ping AO and Yasuo ONO

Synopsis

It is required that the gate electrode of the *AlGaN/GaN HFET* device have to have a narrow line width, which is estimated approximately 100 nm, to achieve the operation in the millimeter wave band. Furthermore, the fabrication process for the electrode should be the simple and high reproducibility process to make such nanoscale structure. The bi-layer electron beam (EB) lithography process is one of the key technology to achieve this purpose.

In this study, the combination of the EB resists, *ZEP520A/PMGI* was selected for the bi-layer EB lithography process, and its feasibility study was examined. As the result, it was obtained that the γ value, which shows the contrast of the resist, had a strong relationship with the development time. γ =7 was achieved by reducing the development time than the time which has been used widely. The solubility rate of the EB exposure pattern was also evaluated. Approximately 150nm width of the space pattern was obtained as the best resolution using this result.

1. 緒言

窒化ガリウム(GaN)へテロ接合トランジスタ (HFET)は、ヘテロ界面に形成されるチャネルの電 子密度を大きくできること、キャリヤの移動度が 高いことやバンドギャップが大きいことなどか ら、高出力および高耐圧なトランジスタとして、 また高周波デバイスとして期待されている⁽¹⁾.こ の GaN HFET をより高い周波数領域であるミリ 波帯で動作可能にする事を目的として、その作製 プロセスの1つであるリソグラフィープロセス の検討を行っている.

GaN HFET をミリ波帯で動作させるためには, 素子の微細化,特にゲート電極幅をサブ 100nm に まで微細化することが必要である.しかし単純に 微細化した場合,ゲート電極抵抗値が高くなるた め,時定数が増加し,動作速度の向上を妨げる原 因となっており,ゲート電極幅の微細化とゲート 電極抵抗の低減を両立できるリソグラフィー方 法が求められている.

この要求を実現するため、電子線直接描画法と 多層レジストを使ってサブ 100nm 線幅の銅細線 を作製できるリフトオフ用レジストパタンを作 製する方法とその極微細化を検討してきた^{(2),(3)}.

その結果,リフトオフに必要な良好なオーバー ハング構造を持ち,かつ約 150nm の解像度を持つ レジストパタンを実現することができた.

この検討において,現像処理条件により解像度

*	電子工学科
**	(株) ST ネット
***	AVC ネットワークス社
****	徳島大学

をビーム径と同程度まで改善できる可能性があることを見いだしたので、その結果について報告する.

2. 実験方法

2.1 実験に使用した電子線描画装置

本実験で使用した電子線(EB)描画装置とは、電 子銃から放出されたガウス形電子ビームを用い、 一筆書きの要領で微細なパタンを描画する装置 である. 描画装置の基本的な構造は電子顕微鏡と 同じであるが、任意のパタンを描画するため電子 ビームを ON、OFF するブランキング電極を備え ている点が電子顕微鏡と異なる. このブランキン グ電極により電子ビームを ON-OFF することで、 希望するパタンの部分にのみ電子線を照射し、パ タンの描画をすることができる. 図1に本実験に 使用した装置の写真を示す. また、実験に使用し た装置の仕様を表1に示す.



図1. 実験で使用した電子線描画装置

表1 実験で使用した電子線描画装置の主な仕様

項目	仕様
1. 加速電圧;	1~30kV (1kVステップ)
2. 電子線源;	LaB ₆ 熱陰極
3.ビーム電流強度;	$1x10^{-8} \sim 5x10^{-12}$ A
4. 最小ビーム径理論値);	5 nm
5.ビーム形状;	丸形ガウス分布
6. 描画方式;	ラスタースキャン (重ね合わせ描画機能追加改造により変更)
7. 描画フィールドサイズ;	200 μm ⁻ , 500 μm ⁻
8. パタン重ね合わせ機能	 "Beam Draw" (1) 画素数 1,000 Pixels/Line 1,000 Line/field (最大 2,000 Pixels/Line 2,000 Lines ∕ field) (2) 階調 256 階調 (3) 重ね合わせ精度 0.4 µm (合わせマークの信号強度による)

2.2 2層電子線レジストプロセス

GaNHFET を高速動作させるためには、ゲート 電極の線幅をサブ 100nm の領域にまで狭め、かつ 微細化による電極抵抗の増大を最小限に留める ために電極膜厚を厚くし電極断面積をできるだ け大きくする必要がある. エッチングの困難な銅 のような薄膜の微細加工には、リフトオフ法が用 いられるが、この方法で微細パタンを再現性よく 実現するためには、電極の膜厚より大幅に厚いレ ジスト膜厚でサブ 100nm の解像度を実現し、さら にレジスト剥離を容易にするため逆テーパの断 面形状をもつように加工する必要がある. しかし、



図2 2層レジストによる銅電極, Cuナノワイヤー作製の概略図

これらの要求を単層レジストで同時に実現する ことは非常に困難である.

そこで、本研究では、レジストを2層にし、上 部レジストには超高解像度の実現を、下部レジス トには厚膜で逆テーパ形状実現の役割を持たせ た2層レジストプロセスを考えた.

2 層レジストは、2 種類のレジストを順次重ね 塗りすることにより実現するが、ここで下層レジ ストには、上層レジスト塗布時に上層レジストの 溶媒により溶解し境界部で上層レジストと下層 レジストが混合する"インターミックス"が発生 しないこと、さらに上層レジストの現像液に不溶 であることが必須である.

一方,上層レジストには下層レジストの現像中 に上層のレジストが溶解しない事が必須である. 従ってこの要求を実現できる2層レジストは,水 溶性のポリマをベースにしたレジストと,シンナ ーも現像液も有機溶媒であるレジストの組み合 わせとなる.ここでは,検討の結果,上層レジス トは単層レジストプロセスにおいて 100nm の解 像度を実現できた ZEP520A を用いた.また下層 レジストにはアルカリ可溶である PMGI (Polymethylglutarimide)を選択した.

表2に2層レジストの塗布及び描画条件を示す. 以下簡単に各処理を説明する.まず2層レジスト サンプルを作製する.基板には GaN デバイスの 基板である Al₂O₃ 基板のかわりに電子線後方散乱

表 2. ZEP520A/PMGI 2 層レジスト処理条件

		冬性
 1.PMGI 塗布	;	300 nm スピンコーティング
2. プレベーキング (PMGI)	;	170 °C, 20min., 恒温循環槽
3.ZEP520A 塗布	;	100~300 nm スピンコーティング
4. プレベーキング (ZEP520A)	;	170 ℃,20min. 恒温循環槽
5. 描画	;	加速電圧 : 30 kV 照射電流 : 5x10 ⁻¹² A 倍率 : 500倍 (フィールドサイズ;200µm [□]) フレーム構成 : 10,000Pixel/Line 10,000Line/field
6. レジスト現像 (ZEP520A)	;	現像液 ; ZED-N50 現像液温度 ; 2 3 ℃ 現像時間 ; 任意の時間, ディップ現像、撹拌 現像後膜厚を測定した後, 現像を追加, 膜厚を測定 する. これを繰り返し, 積算現像時間における感度 曲線を測定する. 乾燥 ; N ₂ プロー乾燥
7. レジスト現像	;	現像液 ; TMAH 2.38% 現像液温度 ; 23℃ 現像時間 ; 30sec.ディップ現像, 撹拌 リンス ; 純水、流水 3 min. 乾燥 ; N ₂ プロー乾燥



図3. 感度曲線評価用パタン

によるレジスト感度への影響がほぼ等しいと考 えられるシリコン(Si)基板を使用した. Si は Al₂O₃ 基板より切断し易く,レジスト断面形状観察には 都合がよいという特徴もある.

Si 基板を10mm角にダイヤモンドペンで切断した後,有機物の除去のために剥離液701(東京応化)で90℃で10分間洗浄した.次にアセトンで3分間超音波洗浄した後,さらに*IPA*で3分間超音波洗浄した.その後窒素ブロアーで乾燥した.

次に,下層レジストの *PMGI* を 200nm の膜厚に なるようにスピンコーティングし,170℃,20分 間プレベーキングを行った.充分に冷却した後, その上に *ZEP520A* を 200nm スピンコーティング し,170℃,20分間プレベーキングして2層レジ ストを完成させた.

感度曲線評価用パタンには幅 20µm,長さ 200 µmの短冊状パタン3本のL&Sパタンを1組とす る5行7列,合計35組のパタンを用いた.パタ



表 3 Dose 時間及び Dose 量

感度曲線	評価用パタン ビ	ーム電流 I=100[pA]
No.	Dose時間[μs]	Dose量[μC/cm ²]
#1	0.2	5
#2	0.25	6.25
#3	0.3	7.5
#4	0.35	8.75
#5	0.375	9.375
#6	0.4	10
#7	0.525	13.125
#8	0.675	16.875
#9	0.8	20
#10	1	25
#11	1.2	30
•	•	•
•	•	•
•	•	•
#33	5.6	140
#34	5.8	145
#35	6	150

ン各組で Dose 量を変えて描画した後,現像処理 を行う. ZEP520A の現像には,酢酸 n アミル(ZE D-N50)を用いた.現像後,ブロアーで乾燥させ, 表面荒さ測定器(Dektak3ST)で溶解量を測定し,計 算により残膜率及び規格化膜厚を求め感度曲線 を求めた,その後さらに現像を追加し,乾燥,規 格化膜厚測定を繰り返して感度曲線の現像時間 依存性を調べた.

図4は感度曲線の例である. 横軸は電子線の照 射エネルギー量を示す Dose 量,縦軸は現像後に 残った膜厚を初期膜厚で規格化した膜厚 NT であ る. Dose 量は (1)で定義される. ここで I はビー ム電流[A], t は 1 画素あたりの照射時間[sec], S は照射面積[m²]である.

$$Dose[C/m^2] = \frac{I \times t}{S} \quad \dots \quad (1)$$

また,規格化膜厚 NT は.式(2)により計算により 求めた.

$$NT = \frac{残膜厚}{初期膜厚} = \left[\frac{d_0 - d_n}{d_0}\right] \quad (n = 1, 2, 3) \quad \cdots (2)$$

感度曲線からγ値と感度 D_0 を求めた.γ値は, コントラストとも呼ばれる値で、レジストの解像 度の目安となる値である.感度曲線のコントラス トが高くなるほど、すなわちγ値が高いほどレジ ストの解像度は高くなると考えられる.このγ値 を感度曲線から計算し、その値が積算現像時間に よってどう変化するかを調べた.γ値は以下の(3) 式で定義される.

$$\gamma = |\log_{10}(D_0/D_{100})|^{-1}$$
 (3)

ここで D₀, D₁₀₀ は図 4 に示すように, 感度曲線上

の規格化膜厚NT=0.5の点で接線を引き,NT=0お よび NT=1 と交差した点の Dose 量であり、この うち Doを感度と定義する.

PMGIの現像には, NMD-3(TMAH 2.38%)を使用 した. PMGI は等方的に溶解し, ZEP520A パタン を縁取るようにレジスト縁下部が若干溶解する ので、ZEP520Aによる"オーバーハング"が形成さ れる. その結果, 図 2(b)に示したようなレジスト 剥離を容易にするための逆テーバの構造と同等 の構造を持つレジストステンシルを実現できる.

3.実験結果

3.1 ZEP520A と PMGI のインターミックスと相 互の現像液に対する溶解性

図5はZEPとPMGIのインターミックスを調べ た結果である. PMGI を塗布, ベーキングした後, 重ね塗りするため ZEP520A を PMGI 上に滴下す る. 滴下後の時間を変えて塗布した後全体の膜厚 を測定した.重ね塗り後の全体の膜厚を dp+z とし, PMGI, ZEP520A 単独の膜厚をそれぞれ d_p , d_r と すると、インターミックスがあれば

> $d_{n+z} \leq (d_n + d_z) \quad \cdots \cdots$ (4)

となり, ZEP520A を滴下した後の時間が長くなる ほどその差が大きくなる. 図から d_p+d_z と d_{p+z} はほぼ等しく, インターミックスがほとんど無い ことがわかった. ZEP520A 上に PMGI を塗布した 場合も同様の結果が得られた.これは PMGI が親 水性のポリマであるため, 有機溶媒に溶けにくい ことが理由であると考えられる.

2層レジスト現像時において上層のレジスト は下層のレジストの現像液にさらされることに なる.もし、下層の現像液に溶解する特性があれ



レジスト滴下後スピンコーティング開始までの時間[sec] 図5. ZEP520AとPMGIのインターミックス



図 6. ZEP520A, PMGI 相互の現像液に対する ZEP520A と PMGI の溶解特性

ば、目的の寸法や解像度の高いパタンが得られな くなる. そこで ZEP の PMGI の現像液に対する溶 解性および PMGIの ZEP 現像液に対する溶解性を 調べた. その結果を図 6 に示す. この結果から, ZEP520A は PMGI の現像液に、また PMGI は ZEP520A の現像液にはほとんど溶解しないこと がわかった.

3.2 ZEP520A の感度曲線の測定

図7に現像時間を1,15,30,60,210,500, 1000, 3000sec と現像時間を変化させて測定し た感度曲線の測定結果を示す.現像時間が 1sec の場合、感度 D_0 は約 110 μ C/cm² と低いが、50~ 80µC/cm²の領域ではレジストの膜べりも少なく, また感度曲線の傾斜も急峻であり、高いコントラ ストを示していることがわかる.

一方,現像時間が長くなるのに伴い感度は高く,



図7. 感度曲線の現像時間依存性

すなわち D_0 は低くなるが、感度曲線の傾斜は緩 やかになっていることがわかる.また、低 Dose 量の残膜率が現像時間が長くなるのにつれて、若 干ではあるが低下していることがわかる.

4. 考察

図7におけるNTが0.8から1.0の領域(A領域) 及び0.2以下の領域(B領域)の変化も断面パタ ンの矩形性を決める重要な要素である. A領域は レジスト中に存在する低分子量成分およびEB照 射により分解し分子量が低下したレジストポリ マの溶解性を表していると考えられる. これはレ ジスト断面形状では,開口部の断面形状で主に上 部の形状と膜べりに反映されると考えられる.

一方, *B* 領域はレジスト中に存在する溶解しに くい高分子量成分の溶解性を反映していると考 えられることから,レジスト中に存在する断面パ タンの底部を決める要素であると考えられる.

以上のことから A, B 領域における変化が急で あるほど、パタンの断面形状の矩形性は高くなる と考えられる.このことから、図現像時間が 1sec および 15sec と現像時間の短い処理のほうが、高 い解像度と矩形性を実現できる考えられる.

4.1 y 値と感度 D₀の現像時間依存性

図 8 は図 7 の感度曲線より求めた γ 値と感度 D_0 の関係を表したグラフである. γ 値は現像時間 が短くなるのにつれて大きくなり,現像時間が 1 秒から 10 秒の間で γ 値は約 7 の値を実現できた. 一方,感度 D_0 は γ 値と逆比例し,現像時間が 長くなるのにつれて単調に減少していることが







図 9. ZEP520A の電子ビーム被照射部分の溶解速度

わかる.この結果から、 γ 値と感度 D_0 は相反の 関係にあることが分かった.現像時間が 10 秒以 下での γ 値の挙動の詳細は未検討で今後の検討 課題であるが.7以上の高い値になると予想され るので、高解像度の実現が期待できる.

4.2 レジストの溶解速度

電子線の強度分布はガウス分布をしているた め、ビーム径として定義される範囲より広い範囲 まで電子ビームのエネルギー照射が行われてい ると考えられる.さらにレジストには電子線の基 板からの後方散乱によるエネルギー照射が存在 するので、これによってもビーム系の範囲より広 い領域にまで電子線のエネルギー照射が及んで いると考えられる.

従って実際にレジストに吸収されるエネルギー量の位置におけるコントラストは、入射 Dose のコントラスト に比べて悪くなっていると考え られる.これにより被照射部近傍の未照射部と見 なされる領域のレジストもいくら分解が生じ、現 像時に可溶になっていると思われる.このことか ら描画パタンの端付近の溶解は、深さ方向だけで はなく横方向にも進んでいると考えられる.

このエネルギー照射は避けられないものであ り、それが解像度を決める重要な要素になってい ると思われる.電子線被照射部のレジストが全て 溶解するのに必要充分な時間で現像できれば、こ の避けられない横方向への溶解量も最低限に抑 えることができ、その結果、解像度を改善する事 が出来ると予想される.横方向への溶解領域はご く僅かなもの、数十 nm 程度の寸法であると考え られるが、サブ 100nm の解像度を実現しようとす る場合には大変重要な要素になると考えられる. そこで、必要最低の現像時間を見積もるため、 感度曲線から各 Dose 量における被照射領域のレジストの溶解速度を計算した. 図9は図8より求めた各現像時間の溶解速度を一つのグラフにまとめてプロットしたものである. Dose 量が 115 μ C/cm² と約 60 μ C/cm² の時では,溶解速度はそれぞれ約 280nm/sec,約 10nm/sec と照射エネルギーに比例して指数関数的に増加することがわかる. この結果から 115 μ C/cm² および 60 μ C/cm² の Dose 量を照射した領域では,その膜厚が 200nm の場合,必要充分な現像時間はそれぞれ約 0.7 秒,約 20 秒と推測される.

感度曲線のパタンは描画エリアの領域が 20µm とビーム1本で描画する孤立微細パタンの 20nm に比べ 1000 倍広い. 同じ描画現像条件で処理し た場合, 隣接した描画部分からの影響や後方散乱 による Dose 量の付加による寄与分が大きいため, 面積の広いパタンのほうが,感度は孤立微細パタ ンより高くなると思われる.これまで、これらの影 響を考慮し、線幅が 1um 以下のサブミクロンパ タンの現像時間は210 sec としていたが,今回の 実験結果から現像時間はより短い時間で充分で あると考えられる. サブ 100nm サイズのパタン形 成にはサブミクロンパタンより,より厳密な現像 時間等の制御が必要であることが推測される. 今 後, 秒単位の現像時間の最適化により, γ値をさ らに大きくでき、解像度の改善が期待できると予 想される.

以上で得られた結果をもとに2層レジストパタ ンを処理し,解像度と断面形状を観察した.その 結果を図 10 に示す. *PMGI と ZEP520A* の膜厚は 約 200nm, *Dose* 量は 80µC/cm²,現像時間は 60 sec とした. 描画パタンは 80nm である.開口幅が 約 150nm のぬきパタンとリフトオフを容易にす るための約 500nm のオーバーハングが形成でき ている事がわかる.



図 10. 実際に作製した 2 層レジストパタンの 断面 SEM 写真



図 11. 図 10 の A 部の拡大 SEM 写真

4. 結言

*GaN*を用いた*HFET*をミリ波帯で動作させるために必要なゲート電極の極微細化プロセスについて、2層レジスト*ZEP520A/PMGI*を用いて検討を行った.その結果以下のことがわかった.

- PMG と ZEP520A 間のインターミックスはほとんど発生せず、互いの溶媒および現像液にも不溶なことがわかった.2層レジストとして有用であることをつきとめた.
- (2) 現像時間と解像度の関係を感度曲線を使っ て調べた. 解像度と強い関係を持つγ値は現 像時間が短くなるのにつれて高くなり1から 10secの現像時間で7~8という高い値を示し た. この結果から現像時間により解像度を改 善できる可能性があることがわかった.
- (3) 感度曲線から電子線被照射部の溶解速度を 求めた.115µC/cm²時では溶解速度は約280n m/sec と非常に早いことがわかった.この結 果から現像時間を計算することができ,解像 度の低下の原因である過現像による解像度 低下を防止できることを示唆した.

謝辞

この研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開 発推進制度の支援により実施した.

参考文献

- 大野泰夫,電子情報通信学会誌,84,6,384 (2001)
- 水澤,長岡,敖,大野,平成18年電気関係学 会四国支部連合大会論文集,11-8 (2006)
- 田中,長岡,水澤,平成 19 電気関係学会四 国支部連合大会論文集,11-26 (2007)