●●● 小特集 多価イオン原子過程の基礎と拡がる応用研究

4. 多価イオンの応用

4.3 ナノテクノロジーへの応用

櫻井 誠

神戸大学大学院理学研究科 (原稿受付:2007年4月25日)

多価イオンと表面との相互作用に関する特徴を簡単に述べた後,ナノテクノロジーへの応用に関連のある話 題として,多価イオンの照射あるいは複合プロセスにより,ナノメートルオーダーの構造(ナノ構造)を表面に 生成する研究,多価イオンをナノメートルサイズのビームに「加工」する技術や半導体プロセスにおけるイオン 注入をイオン1個単位で行う「単一イオン注入」,多価イオン衝突による2次電子や2次イオン放出を表面の分析 に応用する研究について概観する.

Keywords:

nanotechnology, nanoprocess, nanostructure, single ion implantation, nuclear spin quantum computer, secondary ion mass spectrometry, surface spin polarization

4.3.1 多価イオンの性質

ここではナノサイエンス・ナノテクノロジーに関連する 多価イオンの性質について考える.多価イオンが物質(主 として固体)と衝突すると、物質表面上の限られた領域(衝 突点近傍)から電子が多価イオンの空準位に移行する.電 子移行により,多価イオンは主量子数の大きな準位に束縛 電子を持つ状態、すなわち高励起状態(中空原子と呼ばれ る)となるため[1], 脱励起過程(オージェ過程)により電 子が真空中に放出される. つまり多価イオンの衝突によ り、(多価イオンを経由して)物質から2次電子が放出され ることになる.この2次電子放出の収率は、数十から数百 にもなることが知られている[2].多価イオンと相互作用 (反応)する固体表面上の領域はナノメートルのオーダーで ある.この電子移行過程の繰り返しにより物質表面のナノ 領域が帯電し、ひいては半導体・絶縁体においては表面原 子のスパッタ現象が起こる.この現象は各種の物質におい て観測されており、クーロン爆発機構(多くの半導体・絶 縁物)[3-6],2正孔生成モデル(水素終端シリコン)[7-9], 励起子生成モデル (GaAs) [10] など,いろいろなモデルを 使って説明されている[11-13].

この電荷移動は多価イオンが表面と衝突する前からおこ り、多価イオンの運動エネルギーが小さくなると衝突前に 終了する.すなわち多価イオンと反応する領域は、物質の 最表面層に限定されることになる.入射多価イオンは中性 化してその多くは固体表面層内に留まる.このような多価 イオンが物質に与える効果は、多価イオンの内部エネル ギーによっているから、入射多価イオンの運動エネルギー に直接は依存しない.これらの性質をまとめると、多価イ オン1個の衝突で,内部エネルギーが解放される結果として,1)数多くの表面原子がスパッタされ,2)表面上ナ ノメートル領域の構造が改変され,3)数十から数百個の 2次電子が生成する,ということになる.多価イオン-固 体表面衝突における2次電子・2次粒子放出現象に関して はいくつかレビューが書かれている[14,15].

この多価イオン-表面反応は、ナノメートルオーダーの 微細プロセス(ナノプロセス)技術として極めて有用であ る. すなわち, 多価イオン-表面反応の空間的広がりは多 価イオンの価数に応じて1~数 nm に限定され,この値は 多価イオンと原子の衝突断面積で明確に規定されることか ら、電子ビームや集束イオンビーム (FIB) のような従来手 法で問題となる、縮小倍率や収差などのビーム輸送系の性 能に左右されない.一方で、もとより多価イオンも荷電粒 子であるから、従来のビーム輸送技術を利用することがで きる. 一般に電子線などのビーム操作によるプロセスは産 業的に確立した効率の高い手法であるから,多価イオンを 用いる場合も高効率化が見込める.したがって、多価イオ ンなら効率性の良い,1nm 台の微細加工が可能(他の手法 での最小値は FIB で 20-30 nm, 極紫外光によるリソグラ フィで13 nm)であり,超高密度化に関して飛躍的な向上が 期待できる. すなわち、多価イオンビームを用いると、 トップダウンアプローチ(高効率)と、ボトムアップアプ ローチ (1 nm オーダーの高分解能)の利点を併せ持つ,他 の手法では到達不可能なナノプロセスが実現できる.

本稿では、多価イオン-固体表面衝突における物理的興味は本小特集2.2節に譲り、ナノテクノロジーへの応用に 関連のある話題に限定して概説する.すなわち、多価イオ

4. Application of Highly Charged Ions 4.3 Application of Highly Charged Ions for Nanotechnology SAKURAI Makoto

author's e-mail: msakurai@kobe-u.ac.jp



図1 (A)Si(111)7×7表面にヨウ素多価イオン(I^{q+}, q = 30, 40, 50)を照射した場合の,照射痕周辺のSTM像.(B)(A)の破線上についての深さ方向分布.(C)(A)の照射痕において,表面第1層が欠損している領域の面積と入射イオン価数の関係[25].

ンの照射あるいは複合プロセスにより,ナノメートルオー ダーの構造(ナノ構造)を表面に生成する研究(4.3.2節), 多価イオンをナノメートルサイズのビームに「加工」する 技術や,半導体プロセスにおけるイオン注入をイオン1個 単位で行う「単一イオン注入」技術(4.3.3節),多価イオ ン衝突による2次電子や2次イオン放出を表面の微小部分 析に応用する研究(4.3.4節)である.

4.3.2 ナノ構造

多価イオン1個の衝突でナノメートルオーダーの領域に 構造変化が起きることが、雲母の表面で初めて観測された [16,17]. その後, グラファイト (Highly Ordered Pyrolytic Graphite) [18-21], プラスチック材料, PMMA [22], サ ファイア[23],水晶[24],シリコン(清浄表面および水素 終端表面) [25, 26], LiF, CaF₂, TiO₂など各種(主として半 導体や絶縁物)の表面で同様の観測がなされている.図1 は Si (111) 清浄表面に特徴的な 7 × 7 再構成表面に多価イ オンを照射した後、観測された走査トンネル顕微鏡 (STM) 像と,これに基づいて照射痕の大きさ・深さを評 価したものである.これらの研究では、清浄表面に多価イ オンを一定量照射した後,STM や原子間力顕微鏡 (AFM) (これらの総称として走査プローブ顕微鏡 (SPM) と呼ぶ) により表面の構造観察を行い、構造変化のおおまかなメカ ニズムを議論している.多価イオンにより生成されたナノ 構造をデバイス応用につなげるには、ナノ構造の結合状態 (結晶構造)や電子構造を明らかにする必要があるが, SPM による観察では、結晶構造を詳細に議論することは難し い.構造に関する踏み込んだ議論は、グラファイトを対象 にした例に見られる. 多価イオン照射試料のラマン分光ス ペクトルが観測されており,非照射領域では見られない, 対称性の低下によって活性となるピークが現れている.

多価イオンのナノテクノロジーへの応用可能性として, 最も望ましいのは,超高真空環境中で清浄表面に多価イオ ンを照射しただけで,周りと電子状態の異なるナノ構造を 生成することであるが,事はそう簡単には運ばない.この 意味で,多価イオンを照射したシリコン表面からフォトル ミネッセンスが観測されたという米国ローレンスリバモア 国立研究所(LLNL)からの報告が一時センセーションを巻 き起こした[26-28].この報告では,多価イオン衝突により バンドギャップ2eV 程度のナノ(酸化)シリコンができ, これにトラップされた励起子による発光が観測されたとさ れている.しかしながら,NIST や我々による追試の結果 は否定的であった[29].シリコンに高速イオンを打ち込ん で多孔質状態にするとルミネセンスが観測されるという例 があり[30],多価イオン入射で同様の効果があれば,発光 するという可能性も全くないではないと思われるが,現在 のところ実験的に再現できていない.

次に考えることは、多価イオン照射の後に何らかのプロ セスを加えることにより、機能性を持たせることである. Borsoniらは水素終端シリコン表面に多価イオンを照射し た後、酸素に暴露することによって、酸化シリコンのナノ 構造を生成したと報告している(図2)[31-33].これは、多 価イオン照射により水素が剥ぎ取られ、その部分だけ反応 性を持つので、酸素が触れると多価イオンが当たった領域 (水素が付いていない領域)のみ酸化するという目論見に基 づいている.

一方,グラファイトの表面においては,多価イオンの照 射痕周辺に分子吸着が選択的に起こることが我々の研究に より明らかになった.これは,照射痕では結晶の対称性が 乱れることで非照射領域より活性となるためと考えられる [34].図3(a)は,I³⁰⁺イオンを照射したグラファイト表面 のSTM 像である.多価イオンが衝突した位置が白い斑点 状に見える.図3(b)はこの表面に,Bis-MSB(色素分子)を 数分子層蒸着した後のSTM 像である.照射痕のサイズが (a)とくらべると大きくなっており,Bis-MSBが照射痕の 周りに選択的に吸着していることを明瞭に示している.



図2 水素終端シリコンに多価イオン Ar⁸⁺を照射した後、酸素を 導入することにより作成した酸化シリコンナノドットの AFM 像. 突起部が酸化シリコンと結論されている. 表はい くつかのドット構造(ラインスキャンの1~3)に対する, 高さ(Vert.)と水平方向の広がり(Horiz.)の測定値を示す [31].







図 3 (a) ヨウ素多価イオン I³⁰⁺入射によるグラファイト表面上 の照射痕の STM 像. (b) (a)の表面に色素分子 (Bis-MSB) を蒸着した後の STM 像[34].

また,目黒らは多価イオンを照射したグラファイトにおいて,STM 探針を使って照射痕に局所的に電流を流した (通電加熱)[35].この処理により,照射痕における走査トンネル分光(STS)スペクトルは,導体の特性を示すグラ



図4 多価イオン(Ar⁸⁺)照射痕と非照射領域で測定されたグラ ファイト表面のSTSスペクトル.照射痕におけるSTSスペ クトルは、バンドギャップ6eVの絶縁体のそれを示してい る[35].

ファイト本来のものと全く異なり,バンドギャップ6eV 弱の絶縁体のそれを示した(図4).バルクダイヤモンドの バンドギャップが5.6eV なので,この処理によりナノダイ ヤモンドが生成されたと報告している.

4.3.3 ナノビーム技術と単一イオン注入

多価イオンのプロセス効果を利用して実用になるデバイ スを作成するためには、多価イオンビームをナノサイズに する必要がある. EBIS 型多価イオン源の原理から, 多価イ オン生成領域の空間広がりは100 µm 程度であり、従来の 静電レンズや磁気レンズを用いて nm サイズに絞ることは できないから,別の工夫が必要である. Stolterfoht らはマ イラー膜に高速イオンビームを照射しNaOHでエッチング することにより100 nmの孔(ナノキャピラリー)を作成し、 これに多価イオン(Ne⁷⁺)を通す実験を行った[36]. 孔の 帯電によりイオンビームガイド効果が生じることが報告さ れている.多価イオンが孔を通過する際に電子をうけとる 確率は数%以下と十分小さい[37].本小特集4.4節で紹介 されているように、孔をテーパ状にしたガラスキャピラ リーを用いて同様のガイド効果に加えて、 収束効果を持た せる試みも行われている[38].多価イオンを実用のナノプ ロセスビームとするためには、単にビームを切り出すだけ ではなく、照射する位置をナノメートル精度で制御する必 要がある.

単一イオン注入(single-ion implantation)とは、半導体 デバイスの不純物キャリア制御のためのイオン注入をイオ ン1個単位で行う技術である.従来のイオン注入では大規 模集積回路の微細化のためデバイス中の不純物密度のばら つきが顕著となり、デバイスの特性にばらつきが生じる. これを解決する方法として、デバイスの各部に1個1個 ドーパント元素イオンを打ち込み、不純物密度のばらつき をなくすのが単一イオン注入である.これまで研究されて きたのは収束イオンビーム露光装置 (FIB)を用いて1-2 価のイオンビームをすばやくチョップする方法であるが [39-41], FIB におけるイオンの加速電圧が高い(20~60 kV)ために,イオンが表面に入射後固体内で散乱し,最終 的にとどまる位置のばらつきが数十 nm になること,これ を低減するため加速電圧を下げると 2 次電子の収率が低下 し,イオンの入射が確実に検知できなくなるという欠点が ある.

この意味で,多価イオンの性質のうち2次電子収率が大 きいことと,この効果が多価イオンの運動エネルギーの効 果ではないこと(運動エネルギーが小さい方が2次電子収 率は大きくなる)は、単一イオン注入への応用上有利な性 質である.我々はグラファイトに多価イオン(Xe²²⁺~ Xe⁴⁶⁺)を照射し,STMで観測される照射痕の面密度と入 射イオンビーム強度,照射時の2次電子放出の頻度を比較 し、イオンの入射と2次電子放出の頻度が数%以内の誤差 で一致することを確かめた[42].

多価イオンを用いた単一イオン注入技術は、多価イオン を用いた実用的技術として最も有望なものの一つと考えら れるが、実用化を意識した研究は我が国では未着手であ り、これからの研究課題である.イオンの入射位置を nm 精度で制御する技術(例えば,孔の開いた AFM のカンチレ バーを用いることにより、AFM 観測で入射位置を特定し ながら、孔でイオンビームをナノサイズに切り出すこと で、ねらったナノ領域に多価イオンを入射させる方法(図 5)が考えられる)、入射イベントを実用的な試料基板から 発生する信号で検出する技術など、今後の地道な研究を重 ねる必要がある.

単一イオン注入のいわば極限的応用として,核スピン量 子コンピュータがある[43-46].1998年にKaneによって提 唱された,この固体素子を用いる量子コンピュータのアイ デアでは,量子情報を担うリン(³¹P)原子を数十 nm 間隔 で配置されたゲート電極下に1個ずつ埋め込む必要がある



図5 入射位置制御方法(案)の概念図.多価イオンビームはマス クと孔あきカンチレバーによってナノビーム化され、試料 (substrate)に入射する.入射位置はこのカンチレバーを用 いたAFM測定により位置決めされる.多価イオンが孔を通 過し試料に入射すると、2次電子が放出されるので、この 2次電子を検出することにより、1個の多価イオンが試料 に入射したことが検知できる.

[43].³¹Pを埋め込む方法として,STMによる原子操作を 用いるボトムアップアプローチと従来のイオン注入のナノ ビーム化によるトップダウンアプローチが考えられるが, 効率やプロセスの単純さで比べれば後者が優っている.米 国ローレンスバークレー研究所(LBL)では多価イオンを用 いた単一イオン注入をqbit作成の要素技術として捉えた量 子コンピュータ開発という野心的な研究課題に挑戦してい る[47,48].

4.3.4 ナノ領域の微量分析・スピン解析

多価イオンと固体表面との衝突による,表面から放出さ れる2次イオンの収率は,1価イオンの場合よりはるかに 多い[49,50].さらに,この2次イオン生成が多価イオンの 内部エネルギーの効果であるため,反応が最表面層で起こ り,表面原子が集中的にスパッタされることになる.これ らの特徴は,ナノ・マイクロビーム化された多価イオンを プローブとした微小部の2次イオン質量分析法(SIMS)と して応用することができる.従来のSIMSに比べ検出感度 が高く,したがってほぼ非破壊に近い条件で,表面に局在 した不純物(特に水素)の高感度分析が可能になると期待 される.図6は水素終端シリコン表面から多価イオン照射 によりスパッタされた水素原子イオンとシリコン原子イオ ンの収率である.高価数になるとプロトンの収率が1を超 えることを示している.

また,多価イオンをプローブとしたユニークな分析法と して,表面から放出される2次電子のスピンを解析するこ とにより,表面の磁性についての情報を得る手法が注目さ れている[51-53].既に述べたように多価イオンでは2次 電子放出の収率が数十から数百個と非常に大きいため,微 小部のスピン解析に利用できる可能性がある.図7は,磁 化した Fe(001)表面に多価イオンを入射した際に,放出さ れる2次電子のエネルギーとスピン偏極度の関係を示す [51].また Unipan らは Ni (110)表面に対する,He²⁺の入



図6 Xe 多価イオン照射により水素終端シリコン表面からス パッタされた、水素原子イオンとシリコン原子イオンの収 率の価数依存性[49].



図7 磁化した Fe(001)表面に、150 keV の多価イオン(N²⁺, N⁵⁺,およびN⁶⁺)を入射した際に放出される2次電子のエ ネルギーとスピン偏極度の関係.破線は2 keV の電子衝撃 の場合を示す[51].

射により放出されるオージェ電子スペクトルの解析によ り,室温の場合スピン偏極率を約-90%と求めている [52].これらの測定結果は多価イオンの電子捕獲過程を介 した放出2次電子が表面のスピンを保存していることを示 唆しており,多価イオンが表面磁性を評価するプローブと して有用であることを示している.ただし,これらの質量 分析法やスピン解析法を,ナノ領域の微小部分析法として 実用化するためには,従来の多価イオン源よりもビーム強 度を向上させるとともに,収束法を工夫して単位面積あた りの入射頻度を格段に増やす必要がある.

4.3.5 おわりに

多価イオンをナノサイエンス・ナノテクノロジーに応用 する研究について概観した.多価イオンと固体表面の相互 作用の結果として起こる現象の多くが,ナノテクノロジー に関連する要素技術に応用できる可能性があることがこれ までの研究で示されているが,実用化を念頭に置いた戦略 的研究は殆どなされていない (LBL の量子コンピュータ開 発が最もそれに近い).これには,従来多価イオン科学が基 礎科学研究者の範疇にあり,応用分野との連携が不得手で あったことなどが背景にあると思われる.

また、これまで述べたように、多価イオンを実用的なナ ノプロセスやナノ領域の分析用プローブとして利用するた めには、イオン源のビーム強度の向上や、単位面積あたり の入射頻度を向上させるための新しいビーム集束法の開発 が必須である.この観点から、我々は多価イオンのナノプ ロセス応用を目的とした合目的型電子ビーム多価イオン源 を開発した[54,55].現在Ar¹²⁺イオンを1ミリ角の領域に 1 nA (10⁹ cps) 近く入射させることができる.ただし現状 では、さらに高価数イオンの生成(あるいは引出し)効率 が悪く、改善の努力をしている. 謝辞

この研究は、科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事 業・研究領域「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・シ ステムの創製」の研究課題「多価イオンプロセスによるナ ノデバイス創製」、および情報通信研究機構・受託研究「多 価イオン生成ナノ構造のデバイス応用に関する研究」等の 経費によって行われた.

参考文献

- [1] J.P. Briand, L. de Billy, P. Charles, S. Essabaa, P. Briand, R. Geller, J.P. Desclaux, S. Bliman and C. Ristori, Phys. Rev. Lett. 65, 159 (1990).
- [2] F. Aumayr, H. Kurz, D. Schneider, M.A. Briere, J.W. McDonald, C.E. Cunningham and HP. Winter, Phys. Rev. Lett. 71, 1943 (1993).
- [3] I.S. Bitensky and E.S. Parilis, J. Phys. (Paris) C 2, 227 (1989).
- [4] H.P. Cheng and J.D. Gillaspy, Phys. Rev. B 55, 2628 (1997).
- [5] M. Sporn, G. Libiseller, T. Neidhart, M. Schmid, F. Aumayr, HP. Winter, P. Varga, M. Grether, D. Niemann and N. Stolterfoht, Phys. Rev. Lett. 79, 945 (1997).
- [6] M. Tona, S. Takahashi, K. Nagata, N. Yoshiyasu, C. Yamada, N. Nakamura, S. Ohtani and M. Sakurai, Appl. Phys. Lett. 87, 224102 (2005).
- [7] N. Kakutani, T. Azuma, Y. Yamazaki, K. Komaki and K. Kuroki, Nucl. Instrum. Methods B **96**, 541 (1995).
- [8] K. Kuroki, H. Torii, K. Komaki and Y. Yamazaki, Nucl. Instrum. Methods B **193**, 804 (2002).
- [9] K. Kuroki, K. Komaki and Y. Yamazaki, Nucl. Instrum. Methods B **203**, 183 (2003).
- [10] T. Schenkel, A.V. Hamza, A.V. Barnes and D.H. Schneider, Phys. Rev. Lett. 81, 2590 (1998).
- [11] T. Schenkel, A.V. Barnes, A.V. Hamza, D.H. Schneider, J.C. Banks and B.L. Doyle, Phys. Rev. Lett. 80, 4325 (1998).
- [12] G. Hayderer, S. Cernusca, M. Schmid, P. Varga, HP. Winter, F. Aumayr, D. Niemann, V. Hoffmann, N. Stolterfoht, C. Lemell, L. Wirtz and J. Burgdörfer, Phys. Rev. Lett. 86, 3530 (2001).
- [13] J. Stöckl, T. Suta, F. Ditroi, HP. Winter and F. Aumayr, Phys. Rev. Lett. 93, 263201 (2004).
- [14] A. Arnau, F. Aumayr, P.M. Echenique, M. Grether, W. Heiland, J. Limburg, R. Morgenstern, P. Roncin, S. Schippers, R. Schuch, N. Stolterfoht, P. Varga, T.J.M. Zouros ans HP. Winter, Surface Sci. Rep. 27, 113 (1997).
- [15] T. Schenkel, A.V. Hamza, A.V. Barnes and D.H. Schneider, Prog. Surface Sci. 61, 23 (1999).
- [16] D. Schneider, M.A. Briere, M.W. Clark, J. McDonald, J. Biersack and W. Siekhaus, Surface Sci. 294, 403 (1993).
- [17] R.E. Marrs, P. Beiersdorfer and D. Schneider, Phys. Today 47(10), 27 (1994).
- [18] D.C. Parks, R. Bastasz, R.W. Schmieder and M. Stöckli, J. Vac. Sci. Technol. B 13(3), 941 (1995).
- [19] N. Nakamura, M. Terada, Y. Nakai, Y. Kanai, S. Ohtani, K. Komaki and Y. Yamazaki, Nucl. Instrum. Methods B 232, 261 (2005).
- [20] M. Terada, N. Nakamura, Y. Nakai, Y. Kanai, S. Ohtani, K. Komaki and Y. Yamazaki, Nucl. Instrum. Methods B 235, 452 (2005).
- [21] Y. Baba, K. Nagata, S. Takahashi, N. Nakamura, N. Yoshi-

- [22] J.D. Gillaspy, D.C Parks and L.P. Ratliff, J. Vac. Sci. Technol. B16(6), 3294 (1998).
- [23] F. Aumayr and HP. Winter, Nucl. Instrum. Methods B233, 111 (2005).
- [24] I.C. Gebeshuber, S. Cernusca, F. Aumayr and H.P. Winter, Int. J. Mass Spectrometry **229**, 27 (2003).
- [25] M. Tona, H. Watanabe, S. Takahashi, N. Nakamura, N. Yoshiyasu, M. Sakurai, T. Terui, S. Mashiko, C. Yamada and S. Ohtani, Surface Sci. 601, 723 (2007).
- [26] A.V. Hamza, M.W. Newman, P.A. Thielen, H.W.H. Lee, T. Schenkel, J.W. McDonald and D.H. Schneider, Appl. Phys. Lett. 79, 2973 (2001).
- [27] A.V. Hamza, M.W. Newman, P.A. Thielen, H.W.H. Lee, T. Schenkel, J.W. McDonald and D.H. Schneider, Appl. Phys. A76, 313 (2003).
- [28] M.W. Newman, Thesis (University of Conneticut, 2000).
- [29] J.E. Sanabia, S.N. Goldie, L.P. Ratliff, L.S. Goldner and J. D. Gillaspy, AIP Conf. Proc. 680, 568 (2003).
- [30] P. Schmuki, L.E. Erickson and D.J. Lockwood, Phys. Rev. Lett. **80**, 4060 (1998).
- [31] G. Borsoni, M. Gros-Jean, M.L. Korwin-Pawlowski, R. Laffitte, V. Le Roux and L. Vallier, J. Vac. Sci. Technol. B 18 (6), 3535 (2000).
- [32] G. Borsoni, N. Bechu, M. Gros-Jean, M.L. Korwin-Pawlowski, R. Laffitte, V. Le Roux, L. Vallier, N. Rochat and C. Wyon, Microelectronics Reliability 41, 1063 (2001).
- [33] G. Borsoni, V. Le Roux, R. Laffitte, S. Kerdilès, N. Béchu, L. Vallier, M.L. Korwin-Pawlowski, C. Vannuffel, F. Bertin, C. Vergnaud, A. Chabli and C. Wyon, Solid-State Electronics 46, 1855 (2002).
- [34] M.Sakurai, M. Tona, S. Takahashi, H. Watanabe, N.Nakamura, N. Yoshiyasu, C. Yamada, S. Ohtani, H.A.Sakaue, Y. Kawase, K. Mitsumori, T. Terui and S. Mashiko, Nucl. Instrum. Methods B257, 297 (2007).
- [35] T. Meguro, A. Hida, M. Suzuki, Y. Koguchi, H. Takai, Y. Yamamoto, K. Maeda and Y. Aoyagi, Appl. Phys. Lett. 79, 3866 (2001).
- [36] N. Stolterfoht, J.-H. Bremer, V. Hoffmann, R. Hellhammer, D. Fink, A. Petrov and B. Sulik, Phys. Rev. Lett. 88, 133201 (2002).
- [37] F.I. Allen, A. Persaud, S.J. Park, A. Minor, M. Sakurai, D. H. Schneider and T. Schenkel, Nucl. Instrum. Methods B244, 323 (2006).

- [38] T. Ikeda, Y. Kanai, T.M. Kojima, Y. Iwai, T. Kambara, Y. Yamazaki, M. Hoshino, T. Nebiki and T. Narusawa, Appl. Phys. Lett. 89, 163502 (2006).
- [39] 大泊 巌:応用物理 64,777 (1995).
- [40] T. Shinada, Y. Kumura, J. Okabe, T. Matsukawa and I. Ohdomari, J. Vac. Sci. Technol. B16(4), 2489 (1998).
- [41] T. Shinada, H. Koyama, C. Hinoshita, K. Imamura and I. Ohdomari, Jpn. J.Appl. Phys. 41, L287-L290 (2002).
- [42] N. Yoshiyasu, S. Takahashi, M. Shibata, H. Shimizu, K. Nagata, N. Nakamura, M. Tona, M. Sakurai, C. Yamada and S. Ohtani, Jpn. J. Appl. Phys. 45 (2A), 995 (2006).
- [43] B.E. Kane, Nature **393**, 133 (1998).
- [44] R. Vrijen, E. Yablonovitch, K. Wang, H.W. Jiang, A. Balandin, V. Roychowdhury, T. Mor and D. DiVincenzo, Phys. Rev. A62, 012306 (2000).
- [45] D. Mozyrsky, V. Privman and M.L. Glasser, Phys. Rev. Lett. 86, 5112 (2001).
- [46] T.M. Buehler, D.J. Reilly, R.P. Starrett, A.D. Greentree, A.R. Hamilton, A.S. Dzurak and R.G. Clark, Appl. Phys. Lett. 86, 143117 (2005).
- [47] T. Schenkel, A. Persaud, S.J. Park, J. Nilsson, J. Bokor, J. A. Liddle, R. Keller, D.H. Schneider, D.W. Cheng and D. E. Humphries, J. Appl. Phys. 94, 7017 (2003).
- [48] T. Schenkel, J.A. Liddle, J. Bokor, A. Persaud, S.J. Park, J. Shangkuan, C.C. Lo, S. Kwon, S.A. Lyon, A.M. Tyryshkin, I.W. Rangelow, Y. Sarov, D.H. Schneider, J. Ager and R. de Sousa, Microelectronic Engineering 83, 1814 (2006).
- [49] S. Takahashi, M. Tona, K. Nagata, N. Nakamura, N. Yoshiyasu, C. Yamada, S. Ohtani and M. Sakurai, Appl. Phys. Lett. 87, 063111 (2005).
- [50] M. Tona, K. Nagata, S. Takahashi, N. Nakamura, N. Yoshiyasu, M. Sakurai, C. Yamada and S. Ohtani, Surface Sci. 600, 124 (2006).
- [51] R. Pfandzelter, T. Bernhard and H. Winter, Phys. Rev. Lett. **86**, 4152 (2001).
- [52] M. Unipan, A. Robin, R. Morgenstern and R. Hoekstra, Phys. Rev. Lett. 96, 177601 (2006).
- [53] M. Unipan, A. Robin, D.F.A. Winters, R. Morgenstern and R. Hoekstra, Phys. Rev. A74, 062901 (2006).
- [54] M. Sakurai, F. Nakajima, T. Fukumoto, N. Nakamura, S. Ohtani and S. Mashiko, J. Phys. Conf. Ser. 2, 52 (2004).
- [55] 櫻井 誠,川瀬悠司,三森恵太,坂上裕之,渡辺裕 文,中村信行,大谷俊介,照井通文,益子信郎:真空 50, 390 (2007).