液体ガリウムイオン源と走査型イオン マイクロビーム*

石 谷 亨**・田 村 一二三**

(昭和57年1月18日 受理)

Investigation on Liquid Gallium Ion Source and Scanning Ion Microbeam

Tohru ISHITANI and Hifumi TAMURA

(Central Research Laboratory, Hitachi Ltd., Kokubunji, Tokyo)

(Received January 18, 1982)

Emission characteristics, such as ion current vs. voltage relationships, ion emission angle, ion current fluctuation, temperature effect, and mass analysis, are measured for a hydrodynamic (EHD) liquid-gallium ion source. A scanning ion microprobe system using a liquid-gallium ion source and a voltage asymmetric three-electrode lens is developed. It produces 2-20 keV Ga^+ beams of $0.1-5 \mu\text{m}$ diameter with 20 pA-8 nA current. This ion optical system is well suited for variable-energy microprobe applications.

1. はじめに

半導体素子の高集積化, つまり LSI (Large Scale Integration) から VLSI (Very Large Scale Integration) への移行に伴い, パターン幅が現在の $2 \sim 5 \mu\text{m}$ から将来 $1 \mu\text{m}$ 以下 (サブミクロン) に狭まる傾向にある. イオンビームのマイクロ化は, この VLSI におけるサブミクロン・ドライプロセス (マスクレス・イオン注入, イオンビーム露光, イオンビーム加工等) や, サブミクロン表面分析などを実現するための技術課題として最近注目をあびている.

イオン・マイクロビームは表面分析装置であるイオンマイクロアナライザ (Ion Microanalyzer, 略して IMA) においてすでに使用しており, デュオプラズマトロン・イオン源を用いて $1 \sim 2 \mu\text{m}\phi$ の最小ビーム径を得ている.¹⁾ さらにビーム径をマイクロ化するには高輝度イオン源の開発が必要であり FI (Field Ionization; 電界電離) イオン源や EHD (Electrohydrodynamic; 電気流体力学) 液体金属イオン源 (略して HED イオン源あるいは

は液体金属イオン源とも呼ばれる) の開発研究が急速に進められている²⁾. 国内においてもいくつかの研究機関から報告がなされている.³⁻⁶⁾ ここではガリウム液体金属イオン源の動作特性とこれを用いた走査型イオンマイクロビームとの予備実験結果について報告する.

2. 液体 Ga イオン源の動作特性

2.1 電流-電圧特性および放射角電流密度

液体金属イオン源は構造上から Fig. 1 (a)~(c) に示すように 3 種類に大別できる. (a) は曲率半径が数 μm のニードルの根元にイオン化物質 (普通は熔融金属) の貯め部

Fig. 1 Three types of electrohydrodynamic (EHD) liquid metal ion source

* 昭和56年9月11日 日本学術振興会第141委員会,
昭和56年10月7日 第42回応用物理学学会学術講演会で講演
** 日立製作所中央研究所 (国分寺市東恋ヶ窪1-280)

Fig. 2 Ion emitter of liquid Ga ion source; (a) before a Ga wetting and (b) after the wetting

Fig. 3 Schematic diagram of liquid metal ion source

を持つニードル・タイプ、(b)は内径が 100 μm 程度の毛細管の中に熔融金属を貯めるキャピラリー・タイプ、(c)は(a)と(b)とを組合せたキャピラリー・ニードル・タイプで、毛細管の中にニードルを通してある。本実験ではニードル・タイプを採用した。つまり、W線のヘアーピンの先端にスポット溶接したW線 (120 $\mu\text{m}\phi$) を電解研磨によりニードル状にし、これをイオン化物質である Ga で十分に濡らした。Fig. 2 (a)と(b)は、Ga で濡らす処理前と処理後のイオンエミッター部の光顕写真である。

動作特性測定用の実験装置の概略をFig. 3 に示す。アノード (イオンエミッター) に対向してカソードをおき、両者間に引出し電圧 V_o を印加した。コントロール電極にはアノードに対し 1 kV 以下の 正あるいは負の電圧を印加し、イオン電流をコントロールした。この電極のもう 1 つの重要な役割は、エミッターの基部にあるイオン化物質にかかる強い引出し電界をシールドし、エミッター先端へのイオン化物質の過剰供給を制限すること

Fig. 4 I_t-V_o characteristics at various filament currents (The estimated anode temperatures at $I_f=0.5, 2$, and 4 are about 200, 400, and 600°C, respectively.)

である。

アノードからの放出イオンビームは、中心軸近傍ビームとその周辺ビームとに二分割され、それらの電流をそれぞれ I_c および I_o として測定した。それらの和は全イオン電流 I_t である。 I_c は本実験ではイオン放射角が約 16° 内のビームに対応している。装置の真空度は $10^{-5} \sim 10^{-4}$ Pa である。

種々のアノード温度 T に対する I_t-V_o 特性をFig. 4 に示す。 T はフィラメント電流 I_f でコントロールし、 $I_f=0.5, 2$ および 4 A の時、 T の推定値はそれぞれ 200, 400 および 600°C である。 $I-V_o$ カーブにイオン放出が始まるしきい電圧 V_c が現れるのが液体金属イオン源の特徴である。

エミッター先端を覆っている液体金属の表面形状は、電界による力と液体の表面張力とのバランスで決まり、Taylor の理論⁷⁾によるとその形状が丁度、半頂角が 49.3°

Fig. 5 I_e , I_o , and I_t — V_0 characteristics of a liquid Ga ion source

の円錐 (Taylor 円錐と呼ばれている) である時、安定であり、この時が $V_0 = V_c$ に対応すると解釈されている。

Taylor の理論によると V_c は次式で与えられる。^{7,8)}

$$V_c = 1.432 \times 10^3 \gamma^{1/2} R_0^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 γ は表面張力 [dyn/cm]、 R_0 はアノードとカソードとの距離 [cm] である。ただし、電極形状は理想化されている。エミッター先端の電界強度については、エミッター形状を近似式で表わすことにより次式のように解析的に与えられる。^{9,10)}

$$E_0 = V_0 / (P_0 R_0)^{1/2} \quad (2)$$

ここでは Taylor 円錐の先端に丸みを持たせており、 P_0 はその曲率半径である。

V_c の式(1)からの計算値は約 12 kV (ただし、 $\gamma(\text{Ga}) \approx 735$ dyn/cm, $R_0 \approx 0.1$ cm であり、Fig. 4 の実験値、4.5 ~ 4.8 kV の約 2 倍となっている。 γ は T の上昇と共に減少するので、Fig. 4 の V_c の T 依存性は式(1)で定性的に説明できる。また、 V_c は大小の曲率半径を持つエミッターを用いた別の比較実験から、曲率半径が小さいほど V_c が低くなる傾向にあることが分っている。

式(2)から E_0 を求めるには、イオン放出中のエミッター先端を顕微鏡などで観察し実測する必要がある。今、 $P_0 \approx 10$ nm と仮定すると、 $V_0 \approx 5$ kV, $R_0 \approx 0.1$ cm の時、 $E_0 \approx 2 \times 10^7$ V/cm である。 E_0 値の精度を上げるには、 P_0 の実測の他、アノード自身やその周辺電極の形状も考慮して電界強度分布を計算する必要がある。さらに、放出イオンの電流密度が高い時は、イオンの空間電荷によるシールド効果も考慮しなければならない¹¹⁾。

マイクロビームを得る時に重要なのは、 I_t や I_o より

Fig. 6 I_e and I_o fluctuations obtained from a liquid Ga ion source

もむしろ I_c の特性である。(本実験での I_c のイオン放射角 $\theta \approx 16^\circ$ の値はサブミクロンビームを作る時の値より 2 ~ 3 桁大きい。) Fig. 5 に I_c , I_o , I_t — V_0 特性を示す。 I_c — V_0 カーブは $V_0 = V_c$ の直後から飽和傾向を示しており、他の I_o および I_t — V_0 カーブと対象的である。

放射角電流密度 ($dI/d\Omega$) については、蛍光板観察により測定した。イオンビーム像はほぼ一様な明るさの円状をなし、 θ は V_0 と共に $1/2$ から 1 rad 程度まで大きくなった。この時の $dI/d\Omega$ は $10^{-1} \sim 10^2$ $\mu\text{A}/\text{sr}$ である。これらの結果は他の報告データ^{12,13)} とほぼ一致している。これらの実験から I_t の V_0 に対する増加は Ω の拡がりや $dI/d\Omega$ の増加とによることが分かった。

アノード先端での Ga の濡れが十分な時は、蛍光板上に一様な明るさの円状の発光は見られず、時間的にも位置的にも不安定な微細なスポット構造を持つ像が観測される。特に濡れがわずかな時には、Wチップの結晶方位を反映した Ga 吸着の FIM (Field Ion Microscopy) 像が得られる。

もう一つの重要な特性は I_c と I_o との時間変動に関する比較データである。これを Fig. 6 に示す。 $\Delta I/I$ で定義した電流変動率は、 I_c と I_o の場合それぞれ数分間において 8% ($I_c \approx 1.2$ μA) および 16% ($I_o \approx 12$ μA) である。もし I_c と I_o が共通にショット・ノイズのみで支配されていると仮定すると、 $\Delta I/I \propto I^{-1/2}$ の関係式を満足するはずである。しかし、Fig. 6 の実験データはこれを満たしておらず、ショット・ノイズが共通のノイズでないこ

とが分かる。この結果は I_e の時間変動が I_e/I_0 の単純比をとっても必ずしも消去できないことを示唆している。

エミッターを Ga で十分に濡らし適当な引出し条件下におくと、Fig. 6 よりさらに安定したイオン電流が得られる。その代表データを Fig. 7 に示す。そこには10分間にわがず数回の微少スパイク状ノズルと約 2%/10 min のドリフトが見られるのみである。(本データでは、電流安定化のためのフィードバック手法をコントロール電極に用いていない。)

Fig. 7 Typical data of I_t current in a good stable state

2.2 放出イオン種とその他の特性

I_t が数 μA 以上になるとエミッター先端から青白い色の弱い発光が光学顕微鏡 (80倍) で観測された。数 10 μA 以上にもなると発光強度も強く、また、発光領域も大きくなり肉眼でも直接見ることができる。Fig. 8 は $I_t \sim 200 \mu\text{A}$ の時の発光部の写真である。最近, Kuk et al.¹⁴⁾ や Venkatesan et al.¹⁵⁾ によってこの光の分光分析が行なわれ、そこには Ga 中性励起原子からのスペクトル (Ga I : 4172 Å, 4033 Å, etc) が強く現われている。

放出イオン種をチェックするため、数 kV で引出したイオンを再び数 10 V までの電位に下げ、四重極質量分析計に導いた。その質量スペクトルの代表例を Fig. 9 に示す。実験条件は、 $V_0 = 7 \text{ kV}$, $T \sim 200^\circ\text{C}$, $I_t \sim 6 \mu\text{A}$ である。スペクトル中の 2 つのピークは、 $^{69}\text{Ga}^+$ と $^{71}\text{Ga}^+$ に対応しており、それらの強度はそれぞれの同位体存在率 (60.2% および 39.8%) によく一致している。Ga 液体金属イオン源の場合、放出イオンの大部分 ($\geq 98\%$) が Ga^+ であり、多価イオンや分子イオンが殆ど含まれていないことがわかる。この結果は V_0 や T の変化に対して殆ど影響を受けなかった。これらの実験データは Swanson et al.¹⁶⁾ や Culbertson et al.¹⁷⁾ のものと一致している。

イオン放出メカニズムについて、最近, Gomer⁸⁾ によ

Fig. 8 Light emission from the anode tip of a liquid Ga ion source at $I_t \sim 200 \mu\text{A}$

Fig. 9 Mass spectrum of emitted ions obtained from a liquid Ga ion source

って理論的検討が報告されているが、まだ完全なものとはなっていない。液体金属イオン源におけるイオン生成モデルに最も近いと言われているものに FIM の電界蒸発モデルがある。このモデルにおける蒸発電界の理論値は、 Ga^+ 、 Ga^{2+} および Ga^{3+} に対してそれぞれ $F_1=1.5 \times 10^8$ 、 $F_2=3.9 \times 10^8$ および $F_3=5.6 \times 10^8$ V/cm である。¹⁸⁾ Fig. 9 において放出イオンの大部分が Ga^+ であることは、この電界蒸発モデルで定性的に説明できる。

イオン種の質量分析、発光分析、イオン放射角電流密度やイオン電流—電圧特性などのより詳細な実験データは、今後、イオン放出メカニズムを解明していく上で重要な情報を与えるものと思われる。

2.3 液体 Ga イオン源の性能のまとめ

液体 Ga イオン源の性能特性を Table 1 にまとめる。この内、エネルギー幅および輝度については他の報告^{2,3,12,19,20)} から引用したものである。なお、輝度、有効ソースの大きさ、放射角電流密度、最大放射電流およびエネルギー幅に関して、液体金属イオン源、FI イオン源、およびデュオプラズマトロン・イオン源、さらに参考までに電界放出型 (Field Emission) と熱電子放出型 (Thermionic Emission) との電子銃も含めた大まかな比較を Table 2 に示しておく。

液体金属イオン源の一般的特徴は次のようにまとめることができる。

- (1) 点状イオン源であり、有効ソースの大きさが小さく輝度が高い。
- (2) イオン化用の物質は溶融できる純金属や合金などが対象である。ただし、その時の蒸気圧は低い方

($\lesssim 10^{-2}$ Pa) が望ましい。

- (3) イオン化用の物質がガス状態でないため、排気速度の速い真空ポンプを必要としない。
- (4) イオン源は 10^{-4} Pa 程度の低い真空でも動作できる。
- (5) 構造が簡単で小型である。

3. イオンマイクロビーム

3.1 走査型イオンマイクロビーム装置

液体金属イオン源におけるマイクロビーム化を検討するため走査型マイクロビーム装置を試作した。^{6,23)} 本節ではその試作装置の概略と予備実験結果について紹介する。これらは次節で検討するマイクロビーム特性の実験サイドからの評価データとなるものである。

装置の概略図を Fig. 10 に示す。エミッターからターゲットまでの光学長は113 mm であり、コンパクトな装置になっている。イオン源は前述のニードルタイプの液体 Ga イオン源である。

Table 1 Characteristics of liquid Ga ion source

Total ion current	: $10^{-1} \sim 10^2 \mu A$
Ion emission angle	: $20 \sim 70$ deg.
Ion angular-intensity	: $10 \sim 10^2 \mu A/sr$
Emitted-ion species	: Ga^+ ($\geq 98\%$)
Energy spread*	: $5 \sim 50$ eV
Brightness ($V_0=21$ kV)**	: 10^6 A/cm ² ·sr

*: Ref. 2, 3, 12, 19, 20

** : Ref. 2, 19, 20

Table 2 Comparison of high brightness ion sources (liquid-metal ion source and field ionization ion source), a duoplasmatron ion source, and electron guns (field emission electron gun and thermionic emission electron gun) characteristics

		Brightness (A/cm ² sr)	Effective Source Size (nm)	Angular Intensity ($\mu A/sr$)	Maximum Total Current (μA)	Energy Spread (eV)
Ion Source	LM (EHD)	$\sim 10^6$ (Ga^+ : 21 keV)	5–500	$10 \sim 10^2$	$\sim 10^2$	5–100
	FI { a*1	$\sim 10^8$ (H_2^+ : 77K)	~ 1	0.5–1 (H_2 : ~ 1 Pa)	$\sim 10^{-1}$	~ 4
	b*2	? (H_2 : 4–20K)	~ 0.5	10–60	?	~ 1
	Duoplasma- tron	$\sim 10^2$ (Ar^+ : 12 keV)	($\sim 10^5$)*3	?	$\sim 10^3$	10–20
Electron Gun	FE	$\sim 10^8$ (5 keV)	5–10	30–50 (W<310>) 100–200 (Zr-W)	$\sim 10^2$	~ 0.3
	TE	$\sim 10^4$ (5 keV)	$\sim 10^4$	$\sim 3 \times 10^4$	$\sim 10^3$	~ 3

*1 : Ref. 21, *2 : Ref. 22, *3 : diameter of anode orifice

Fig. 10 Schematic of a scanning ion microprobe

エミッターから引出されたイオンは、電圧非対称の3電極パトラ・レンズ²⁴⁾によりターゲット上に加速、収束されている。このレンズは、レンズとターゲット間のワーキング距離を変えずに加速エネルギーやレンズ倍率を変え得る特徴を持っている。試料からの二次電子を検知することにより、SEM (Scanning Electron Microscope) と同様な SIM (Scanning Ion Microscope) 像の観察が可能である。本試作装置では、 $V_0 = 2 \sim 20$ kV の広範囲において、イオン電流 I_p が 20 pA $\sim$ 8 nA、ビーム径が $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$ の Ga^+ ビームが得られた。

SIM 像の代表例として、1000 mesh 試料を 17 kV Ga^+ ビーム (ただし、 $I_p \approx 80$ pA) で照射して得られたものを Fig. 11 に示す。この像の像分解能は約 $0.1 \mu\text{m}$ である。種々の加速電圧に対するビーム収束状態を Fig. 11 と同じ試料を用い SIM 像で観察した。Fig. 12 (A) $\sim$ (D) はそれぞれ 15, 10, 5 および 2 kV の Ga^+ ビーム照射による SIM 像である。試料上でのイオン電流密度は V に依存し、 $10^2 \sim 10^{-1}$ mA/cm² である。

ビーム径は SIM 像観察の他に、シャープエッジとファラデー・カップとの組合せ法によっても直接測定した。²³⁾ この方法による実測ビーム径は、SIM 像の像分解能の $1/2 \sim 1/3$ であることが分かった。本装置で得られたプローブ電流密度は、 $V_0 \approx 20$ kV の時、約 10^{-1} A/cm² であり、Seliger らの報告値 (ただし、 $V_0 = 57$ kV)²⁰⁾ と比べて約一桁小さい。この差は V_0 値の違いを考慮すれば説明できるものであり、イオン源を含めイオン光学系のビーム収束性能については両者間に大差はないものと思

Fig. 11 SIM image of 1000-mesh bombarded by 17 keV Ga^+ beam

われる。

3.2 最小ビーム径の検討

ここでは高輝度イオン源を用いたマイクロビームの最小ビーム径について検討する。最小ビーム径 $d_{\min}$ は次式で計算できる。²⁵⁾ ただし、非点収差などの軸非対称収差については補正ずみとする。その光学系を模式的に Fig. 13 に示す。レンズ系は一段レンズであっても二段レンズであっても本質的に取扱いは同じである。

$$d_{\min}^2 = (M\rho)^2 + d_c^2 + d_s^2 + d_d^2 \quad (3)$$

ここで、 M はレンズ倍率、 ρ は有効ソースの大きさ、 d_c 、 d_s および d_d はそれぞれ色収差、球面収差、および回折収差によるビームの拡がりである。 d_c 、 d_s 、 d_d および M は次式で表わされる。

$$d_c = MC_c \alpha_0 \Delta V / V_1 = M^2 C_c \alpha_1 (\Delta V / V_0) (V_0 / V_1)^{3/2} \quad (4)$$

$$d_s = (1/2) MC_s \alpha_0^3 = (1/2) M^4 C_s \alpha_1^3 (V_0 / V_1)^{3/2} \quad (5)$$

$$d_d = 1.22 (\lambda / \alpha_1) \quad (6)$$

$$M = (V_1 / V_0)^{1/2} (\alpha_0 / \alpha_1) \quad (7)$$

ここで、 C_c および C_s はそれぞれレンズの物面 (イオン源) 側における色収差および球面収差係数である。 $e\Delta V$ は放出イオンのエネルギー幅、 eV_0 は加速エネルギー、 eV_1 は引出しエネルギーである。 α_0 はエミッターでのビーム放射半角、 α_1 はターゲット上でのビーム収束半角である。

C_c と C_s とはレンズの像面側でも定義でき、これらは物面側のものと次のような関係にある。

$$C_c' (\text{像面側}) = M^2 (V_0 / V_1)^{3/2} C_c \quad (8)$$

$$C_s' (\text{像面側}) = M^4 (V_0 / V_1)^{3/2} C_s \quad (9)$$

λ は de Broglie 波長 ($=h/p$, ただし h は Planck 定数、 p はイオンの運動量) であり、イオンの質量数を m [amu], 加速電圧を V_0 [V] であらわすと、

$$\lambda = 2.87 \times 10^{-2} / (V_0 m)^{1/2} \text{ [nm]} \quad (10)$$

となる。例えば、 H^+ イオン ($m=1$ amu) を 1 V 加速し

Fig. 12 SIM images of 1000-mesh bombarded by Ga^+ beam at various beam energies; (a) 15 keV, (b) 10 keV, (c) 5 keV, and (d) 2 keV

たものは $\lambda = 2.87 \times 10^{-2} \text{ nm}$ にすぎず、サブミクロン領域で議論するときは一般に d_d は無視できる。

式(3)において d_c の係数を 2 でなく 1 にとったのは、ビーム径が最小になるのはガウス面ではなくその少し手前であり、その大きさがガウス面での値の半分となることを考慮したためである。 d_s の係数を 2 ではなく $1/2$ にとったのも同様の理由による。(厳密には d_c および d_s の最小錯乱円が必ずしも同じ位置にくとは限らない。)

ρ は有効ソースの大きさであり、FE電子銃の場合と同様な取扱いができると考えると次式が成立する。²⁶⁾ (Fig. 14参照)

$$\rho = 2R(V_T/V_1)^{1/2} \quad (11)$$

ここで、 R はエミッターの曲率半径、 eV_T はイオンがエミッターから放出される時のエネルギーの横方向成分である。

プローブ電流 I_p は放射角電流密度 ($dI/d\Omega$) と次の関係がある。

$$I_p = \pi \alpha_0^2 (dI/d\Omega) \quad (12)$$

また、イオン源の輝度 B は次式で与えられる。

$$B = I_p / [(\pi \rho^2 / 4) \cdot (\pi \alpha_0^2)] \quad (13)$$

$$= 4(dI/d\Omega) / (\pi \rho^2) \quad (14)$$

はじめに ρ について検討する。式(11)において $eV_T \approx \Delta E$ と近似する。 R については実験データが少なく、Swanson ら²⁷⁾ の Ga イオン源のデータ、 $R \approx 0.06 \mu\text{m}$ 、 $\Delta E = 5 \sim 30 \text{ eV}$ を用いると $\rho = (3 \sim 7) \text{ nm}$ となる。Sudraud ら^{28, 29)} の Au イオン源では $R \approx 3 \mu\text{m}$ 、 $\Delta E = 50 \sim 70 \text{ eV}$ から $\rho = (5 \sim 6) \times 10^2 \text{ nm}$ となる。ただし、 $eV_1 = 8 \text{ keV}$ と仮定した。両者の ρ の値には約 2 桁の差があるが、この差がイオン種の違いによるものと断定するにはまた実験データが不足している。いま、 $\rho = 10 \text{ nm}$ 、

Fig. 13 Schematic of ion beam focussing optical system

$dI/d\Omega = 10 \mu\text{A/sr}$ とすると B は式(14)より約 $1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{sr}$ と推定される。

Fig. 10 で用いた 3 電極パトラ・レンズの性能 (計算値) は、 $V_1 = 7 \text{ kV}$ 、 $V_0 = 20 \text{ kV}$ の時、 $C_c = 19 \text{ cm}$ 、 $C_s = 470 \text{ cm}$ 、 $M = 0.75$ であり、 $dI/d\Omega = 20 \mu\text{A/sr}$ 、 $\Delta E = 12 \text{ eV}$ とした時の $d_{\min}$ を I_p の関数として式(3)より求め、これを Fig. 15 に示す。 I_p を 10 nA 以上にしようすると $d_{\min}$ は主として球面収差で支配され、逆にそれ以下の領域では色収差で支配されていることが分かる。色収差が支配的である領域では $d_{\min} \approx d_c \propto I_p^{1/2}$ であり、ターゲット上での電流密度 $J_p (= 4I_p / \pi d_{\min}^2)$ は、 $d_{\min}$ の大きさ

Fig. 14 Schematic diagram of imaginary crossover and imaginary anode in the spherical ion-extraction field

によらず一定となる。Fig. 14 において $d_{\min} \approx d_c$ の領域では、 $J_p \approx 0.1 \text{ A/cm}^2$ となる。この値は実測値とほぼ一致しており、レンズ系が計算値どおりの性能を発揮していることが分かった。

Ga は融点、蒸気圧およびエミッター材との濡れ性などの点から液体金属イオン源のイオン化物質として非常に使いやすい物質である。しかし、Ga イオンの高濃度照射は実験条件によっては試料表面に Ga 凝縮現象を起こし、照射効果の場所的均一性を損わせることもあるので、応用分野によってはその対策を考える必要が出てくるかもしれない。³⁰⁾

4. おわりに

本研究ではイオンビームのマイクロ化という観点から、液体 Ga イオン源の動作特性と、これを用いた走査型イオンマイクロビームについて検討した。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 液体 Ga イオン源において、イオン放射角は引出し電圧とともに大きくなり 20° から 70° 程度まで変化する。この時のイオン放射角電流密度は $10^{-1} \sim 10^2 \mu\text{A/sr}$ である。また、このイオン源からの放出イオン種の大部分 ($\geq 98\%$) は Ga^+ である。
- (2) 広エネルギー範囲でサブミクロンあるいはミクロン径のイオンビームの形成を可能とする走査型イオンマイクロビーム装置を試作した。この装置のポイントは、液体金属イオン源と電圧非対称の 3 電極レンズとの組合せ構成にある。 Ga^+ ビームに対しては $2 \sim 20 \text{ keV}$ のビームエネルギー範囲で、ビーム径が $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$ 、プローブ電流が $20 \text{ pA} \sim 8 \text{ nA}$ のマイクロビームを得ることができた。

最後に、本研究を遂行するにあたり終好有益な討論をして頂いた日立製作所中央研究所、岡田修身主任研究員

Fig. 15 Calculated curve of a minimum probe diameter versus a probe current

に深謝する。また、イオン源および装置の設計に対し、同研究所、山本恵彦主任研究員、戸所秀男および土生徹両研究員に貴重な助言や協力を頂いた。ここに謝意を表したい。

文 献

- 1) H. Tamura, T. Kondo and T. Hirano: Proc. 6th Intern. Conf. X-ray Optics and Microanalysis (University of Tokyo Press, 1972) p. 423
- 2) R. Levi-Setti: Adv. Electron. Electron Phys., Suppl. **13A** (1980) 261
- 3) 蒲生, 難波: 応用物理 **50** (1981) 542
- 4) H. Kuwano, K. Yoshida and S. Yamazaki: Japan. J. Appl. Phys. **19** (1980) L615
- 5) M. Komuro and H. Kawakatsu: J. Appl. Phys. **52** (1981) 2642
- 6) T. Ishitani and H. Tamura: Proc. 5th Symp. on Ion Sources and Ion-Assisted Technology (Tokyo, 1981) p. 129
- 7) G. Taylor: Proc. Roy. Soc. (London) **A280** (1964) 383
- 8) R. Gomer: Appl. Phys. **19** (1979) 365
- 9) T. Ishitani and H. Tamura: Appl. Phys. **23** (1980) 193
- 10) T. Ishitani and H. Tamura: 27th Intern. FE Symp. (Tokyo, 1980) p. 194
- 11) T. Ishitani, H. Koike and N. Sakudo: Japan J. Appl. Phys. **21** (1982) L155.
- 12) L. W. Swanson, G. A. Schwind, A. E. Bell and J. E. Brady: J. Vac. Sci. Technol. **16** (1979) 1864
- 13) P. D. Prewett and D. K. Jefferies: J. Phys. D **13** (1980) 1747
- 14) Y. Kuk, T. Sakurai, G. H. Robertson, R. J. Culbertson, J. E. Rowe, T. N. C. Venkatesan and A. Wagner: Appl. Phys. Lett. **36** (1980) 957
- 15) T. Venkatesan, A. Wagner and D. Barr: Appl.

- Phys. Lett. **33** (1981) 943
- 16) L. W. Swanson, A. E. Bell, G. A. Schwind and D. Larson: 27th Intern. FE Symp. (Tokyo, 1980) 418
 - 17) R. J. Culbertson, G. H. Robertson, Y. Kuk and T. Sakurai: J. Vac. Sci. Technol. **17** (1980) 203
 - 18) T. T. Tsong: Surf. Sci. **70** (1978) 211
 - 19) V. E. Krohn and G. R. Ringo: Appl. Phys. Lett. **27** (1975) 479
 - 20) R. L. Seliger, J. W. Ward, V. Wang and R. L. Kubena: Appl. Phys. Lett. **34** (1979) 310
 - 21) J. Orloff and L. W. Swanson: J. Vac. Sci. Technol. **15** (1978) 845
 - 22) G. R. Hansen and B. M. Siegel: J. Vac. Sci. Technol. **16** (1979) 1875
 - 23) T. Ishitani, H. Todokoro and H. Tamura: J. Vac. Sci. Technol. **19** (1982) 80.
 - 24) K. Kuroda, H. Ebisu and T. Suzuki: J. Appl. Phys. **45** (1974) 23
 - 25) 裏克己: 電子光学 (共立出版, 1979) p. 178
 - 26) T. E. Everhart: J. Appl. Phys. **38** (1967) 4944
 - 27) L. W. Swanson, G. A. Schwind and A. E. Bell: J. Appl. Phys. **51** (1980) 3453
 - 28) P. Sudraud, P. Ballongue, C. Colliex, R. Ohana, J. Van de Walle: Electoron Microscopy 1980-vol. 1, p. 96
 - 29) P. Sudraud, C. Colliex and J. Van de Walle: Journ. de Phys. Letters **40** (1979) L207
 - 30) T. Ishitani, A. Shimase and H. Tamura: Appl. Phys. Lett. **39** (1981) 627