講座

イオンビーム利用の基礎と現状

V. イオンビームの応用

1. 理工学利用

1.4 局所照射分析[†]

神谷富裕

日本原子力研究所高崎研究所放射線高度利用センター
370-12 群馬県高崎市綿貫町 1233

Key Words: local area irradiation, ion beam analysis, ion microbeam, single ion hit

1. はじめに

マイクロビーム¹⁾は、高速のイオンビームを試料の位置で 10 μm 以下のサイズに微細化したものである。これは主に軽イオンビーム入射による内殻電子励起 X 線放出 (PIXE) や、後方散乱 (RBS), あるいは核反応 (NRA) 等の物質との相互作用の素過程を利用した微量元素分析を試料の微小領域に適用し、多次元的な元素分布や構造解析を行うために開発された²⁾⁻⁶⁾。これに対して「局所照射分析」の手法は、イオンビーム、特に高エネルギー重イオンビームの特徴であるイオン飛程の直進性、打込み深さ分解能、および飛程に沿ったエネルギー付与率の高さに着目し、高エネルギーマイクロビーム装置と組み合わせ、さらにその特質を生かした利用法で、半導体や生物細胞といった微細構造をもつ試料における局部照射効果の研究やビーム加工等の研究に用いられようとしている⁷⁾。今

回は、こうしたイオンマイクロビームの新しい応用の手法に焦点を当て、具体例や問題点について記す。また、半導体やバイオテクノロジー分野で重要となる高エネルギーイオン入射のタイミングと個数を抑制するシングルイオンヒット技術⁸⁾⁻¹⁰⁾についても述べる。

2. マイクロビームとその利用

200 keV 以下のエネルギー領域のイオンビームは、加速や減速が容易であり、ビーム輝度の高い液体金属イオン源等を用いて数十 nm のビーム径の形成が可能である。これは集束イオンビーム (focused ion beam ; FIB) と呼ばれ、半導体微細加工における表面のマスキング加工¹¹⁾や直接蒸着技術に応用されている¹²⁾。

MeV 領域では、主に静電加速器のビームライン上にマイクロビーム形成のためのレンズシステムを設置して実験が行われる。現在、1 μm 以下程度のビーム径形成が可能であり、マイクロビーム分析のほか、局所照射分析装置として宇宙用半導体素子におけるシングルイベント効果 (高エネルギー重イオンの単発入射によって引き起こされる素子の誤動作, 図 1) の微視的機構解明の研究¹³⁾⁻¹⁵⁾に利用されている。このほか、図 2 に示した生物細胞の特定部位へのイオン打込みにより照射損傷およびその

[†] Fundamentals and Present Aspects of Ion Beam Technology. V. Application of Ion Beam. 1. Application to Physical Sciences. 1.4 Local area irradiation analysis. Tomihiro KAMIYA: Advanced Radiation Technology Center, Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute, 1233, Watanuki-machi, Gunma-Pref. 370-12, Japan.

図1 宇宙線による半導体素子のシングルイベント

図2 イオンビームによる細胞局部照射

回復機構の解明,あるいは積極的な細胞加工の研究をより効率的に行うことが可能である。極微量のイオン入射によって起こる局所照射効果の観察は,事前にビームサイズと照射位置が正確に評価できるだけの電流量が確保できれば,イオンビーム分析の場合のような電流量は必要なく,マイクロビーム形成にとっては有利な利用法である。実際にはビーム電流をさらに少なくし,究極には1個1個のイオンを目的の位置に打ち込むシングルイオンヒットが求められる。また,この種の実験にはイオンを打ち込む位置の絶対的な正確さが求められる。したがって,通常のビームサイズの評価にはかからないビームハローの広がりや量を事前に評価しておく必要がある。

3. シングルイオンヒットシステム

シングルイオンヒットシステムは,図

3に示したようにイオンの入射を検出するシングルイオン検出器と後続のイオンを遮断する高速ビームスイッチによって構成される。

シングルイオンの検出には,マイクロチャンネルプレート(MCP)などを用いて,入射イオンの炭素薄膜透過やターゲット試料ヒットに伴って放出される二次電子を検出する。この例で2個の検出器を用いているのは,同時計数によってノイズの影響を除外するためである。

高速ビームスイッチは,高圧電源と静電偏向電極によって構成される。シングルイオン検出期からのHV_{on}によって高電圧が立ち上がって後続のイオン入射が禁止され,HV_{off}信号によって解除される。HV_{off}にパルサーの周期信号を入力すると,それとほぼ同期したタイミングでターゲットにイオンを入射することができる(図4)。また,パルス数をあらかじめ設定しておけば入射イオンの個数も制御できる。

ただし,シングルイオンを検出してから高電圧が立ち上がるまでには時間(スイッチング時間)が必要である。高速ビームスイッチへのイオンの入射の間隔はランダムであるため,スイッチング時間内に余分なイオンが入射する確率は0ではないことを考慮しなければならない。

4. 展 望

半導体回路の集積度はますます上昇し,メモ

図3 シングルイオンヒットシステムの概念図

図 4 シングルイオンヒットタイミング模式図

リーセルのゲート長は $\sim \mu\text{m}$ からサブ μm , さらに $\sim \text{nm}$ の領域に向かっている。究極には量子効果を取り入れた素子が誕生すると考えられており、素子の作製においても原子のレベルでのイオン注入技術が必要となる。この基礎技術の開発のため、FIB 装置とシングルイオン照射技術とを用いた新しい研究が行われようとしている¹⁶⁾。

宇宙開発でも半導体技術への依存度はますます重要となるが、素子の集積度をさらに高密度にすることにより、シングルイベント効果の発生確率はますます高くなる。今後は、銀河中心から発した 1 核子あたり数 10 MeV の高エネルギー重イオンによるシングルイベント現象を再現し、微視的な機構解明を行うための大型加速器を用いた高エネルギーマイクロビーム装置とシングルイオンヒットシステムの実現が望まれる。また、この技術は、透過力の大きい高エネルギー重イオンによる生物細胞の狙い射ちによる細胞融合や高分子材料への穴開け加工など幅広い応用の可能性ももっている。

このほか、局部照射分析には潜在的な広い応用分野があると思われる。それを開拓し発展させていくには、マイクロビーム技術の開発はもとより、利用目的に適合した利用者の使いやす

い計測・制御システムを開発していく必要がある。

文 献

- 1) 田中隆一: *Radioisotopes*, **44**, (2), 58-62 (1995)
- 2) Watt, F. and Grime, G.: "Principles and Applications of High Energy Ion Microbeams", Adam Hilger, Bristol (1987)
- 3) Traxel, K.: *Nucl. Instr. Meth.*, **B50**, 177-188 (1990)
- 4) 高井幹夫: 応用物理, **60**, 652-662 (1991)
- 5) Takai, M.: *Nucl. Instr. Meth.*, **B85**, 664-675 (1994)
- 6) 堀野裕治: 応用物理, **64**, 438-444 (1995)
- 7) 田中隆一: 放射線, **20**, (3), 21-32 (1994)
- 8) Fischer, B. E.: *Nucl. Instr. Meth.*, **B54**, 401-406 (1991)
- 9) Matsukawa, T., Noritake, K., Koh, M., Hara, K., Goto, M. and Ohdomari, I.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**, 4025-4028 (1992)
- 10) Kamiya, T., Utsunomiya, N., Minehara, E., Tanaka, R. and Ohdomari, I.: *Nucl. Instr. Meth.*, **B64**, 362-366 (1992)
- 11) 藤田直史, 大竹利也, 井上和則, 後藤康仁, 辻博司, 石川順三: Proc. of 5th Symp. on Beam Engineering of Advanced Material Syntheses, Tokyo, pp. 101-104 (1994)
- 12) 石川順三, 長町信治: Proc. of 4th Symp. on Beam Engineering of Advanced Material Syntheses, Tokyo, pp. 219-222 (1993)
- 13) Takai, M., Mokuno, Y., Chayahara, A., Kiuchi, M., Fujii, K. and Satou, M.: *Nucl. Instr. Meth.*, **B77**, 8-16 (1993)
- 14) Matsukawa, T., Noritake, K., Koh, M., Hara, K., Goto, M. and Ohdomari, I.: *ibid.*, **B77**, 239-242 (1993)
- 15) Nashiyama, I., Hirao, T., Kamiya, T., Yutoh, H., Nishijima, T. and Sekiguchi, H.: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-40**, (6), 1935-1940 (1993)
- 16) Ohdomari, I., Koh, M., Matsukawa, T. and Koyama, M.: Proc. of Int. Conf. on Advanced Microelectronic Device and Processing, pp. 697-702 (1994)