

삼각전압소인법을 이용한 강유전체 박막내에서의 분극 및 유동이온에 대한 평가

Evaluation of polarization and mobile charge in ferroelectric films using TVS(Triangular Voltage Sweep) method

김용성*, 이남열*, 정순원*, 김진규*, 정상현*, 김광호**, 유병곤***, 이원재***, 유인규***, 양일석***
(Yong-Seong Kim*, Nam-Yeal Lee*, Soon-Won Jung*, Jin-Kyu Kim*, Sang-Hyun Jeong*,
Kwang-Ho Kim**, Byung-Gon Yu***, Won-Jae Lee***, In Kyu You***, Yil-Suk Yang***)

Abstract

The detection technique both the polarization and the mobile charge density at the same time in ferroelectric films on Si using TVS method have been proposed. This method yields a polarizable and an ionic displacement current peaks whose areas are proportional to the total polarization reversal charge and the total mobile ionic space charge, respectively. The calculated polarization and the mobile charge density were $0.42 [\mu C/cm^2]$ and $5.5 \times 10^{11} [ions/cm^2]$ in the SBT film of MFIS structure measured at $250^\circ C$, and $1.4 [\mu C/cm^2]$ in the $LiNbO_3$ film of MFS structure measured at $300^\circ C$, respectively.

Key Words(중요용어) : TVS(Triangular Voltage Sweep) method,
ferroelectric-gate structure, MFIS structure, MFS structure,
polarization, mobile ionic charge density, MFSFET

I. 서 론

강유전체 메모리를 구현함에 있어 몇 가지 중요한 문제점들 중 FET의 낮은 data retention time의 원

인들 중 하나로 예상되는 게이트 누설전류의 근본적인 원인과 그에 대한 개선책을 찾기 위한 선행적 실험으로 삼각전압소인법 (Triangular Voltage Sweep method; TVS method¹⁻⁵⁾)을 이용하여 MFS, MFIS 소자들에 대해 박막 내 유동이온의 밀도 산출에 관한 논문⁶⁾을 발표한 바 있다.

본 논문에서는 과거 논문에 대해 추가적으로 강유전체 박막의 분극반전 전하량을 TVS법으로 산출하였던 바, 이에 대해 논의 하고자 한다.

* 청주대학교 일반대학원 전자공학과
(충북 청주시 상당구 내덕동 36번지 청주대학교,
FAX: 0431-229-8432, E-mail: b729ys@shinbiro.com)
** 청주대학교 전자·정보통신·반도체공학부
*** 한국전자통신연구원

II. 분극 및 유동이온의 산출

II-1 측정방법

TVS 측정에 사용된 MFIS 소자는 SBT 강유전체 박막, MFS 소자는 LiNbO₃ 강유전체 박막을 사용하였으며, 각 시편들은 250°C, 300°C로 가열된 상태에서 측정을 행하였다. 이들에 대한 TVS 측정에는 pA Meter / DC Voltage source (HP4140B), LF Impedance Analyzer (HP4192A) system을 이용하였다. 단지, 유동이온에 대한 검출을 위해 제안되었던 TVS법에서는, 삼각전압 ramp가 가열된 일정 온도에서 측정된 게이트 및 이온 변위전류에 적용한다.

본 연구에서는, TVS법을 이용하여 처음으로 강유전체-게이트 구조의 박막에 대해서 유동이온 전하와 분극을 동시에 측정할 수 있음을 보인다. 강유전체-게이트 구조에서의 게이트 변위전류, I_G 는 다음과 같이 정의된다.

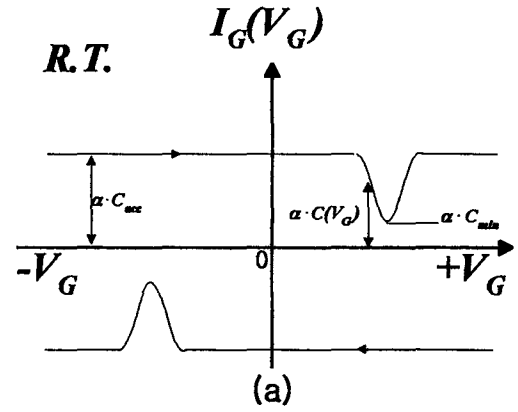
$$\begin{aligned} I_G &\equiv dQ_G/dt \\ &= (dQ_G/dV_G) \cdot (dV_G/dt) \quad [1] \\ &= \alpha \cdot C(V_G) \end{aligned}$$

[1]식에서 Q_G 는 게이트전하이며,

$$Q_G = \int_{-V_G}^{+V_G} [I_G - \alpha C_{acc}] dV_G \quad [2]$$

$C(V_G)$ 는 미분용량, α 는 게이트 삼각전압 ramp을 이다. 이상적일 때의, 실온 및 고온에서 유동이온 전하를 갖는 경우(파선)와 그렇지 않은 경우(실선)의 강유전체-게이트 구조에 대한 변위전류 곡선의 모양을 각각 그림 1.(a)와 (b)에 나타냈다. 실온에서의 게이트 전류는 저주파 미분용량의 크기에 비해 하며 그 모양은 그림 1.(a)와 같이 나타난다. 이때, 아래로 향하는 피크(왼쪽에서 오른쪽)와 위로 향하는 피크(오른쪽에서 왼쪽으로 진행)에 해당하는 부분은 강유전체의 분극용량과 반도체 표면에 유도된 공핍용량의 합으로 나타난다. 이때, 박막 내에 유동이온이 존재한다면 실온에서는 대부분의 유동이온들은 박막 내에 완전히 trap된 상태로 머물게 되는 반면, 고온에서는 반도체 표면에서의 진성 캐리어 농도가 급속히 증가하여 C_{min}/C_{acc} 값의 증가가 야기된다.

그러나, 강유전성 용량에 의한 C_{min}/C_{acc} 값은 온도



————— Without Ions
- - - - - With Ions

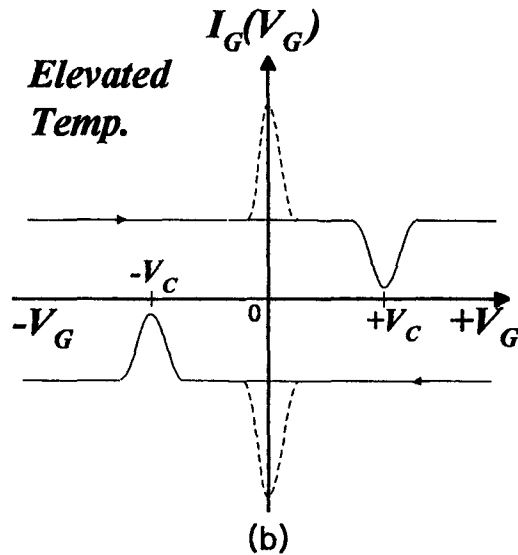


그림 1. 실온(a)과 고온(b)에서 p-type 기판을 갖는 강유전체-게이트 구조의 유동이온전하를 갖는 경우(파선)와 갖지 않는 경우(실선)의 선형 전압 ramp에 응답하는 변위전류 곡선

Fig. 1. Typical displacement current as a function of gate bias in response to a linear voltage ramp in a FG structure having p-type substrate with(dash curve) and without(solid curve) mobile ionic charge at room temperature (a) and elevated temperature (b), respectively

가 증가하더라도 박막의 강유전성 요소에 기인한 변위전류는 미분용량에 비례하므로 그대로 남게 된다. 유동이온이 존재하는 경우 고온에서는, $V_G=0$ 근처에서의 게이트 전류 피크가 그림 1.(b)의 곡선처럼 겹쳐져 나타난다. 큰 음의 바이어스에서는 모든 유동이온이 금속-강유전체 계면에 위치하고, 게이트에 흐르는 전류는 C_{acc} 에 비례한다.

가열된 상태에서의 변위전류의 baseline은 평평하고, $I_G \approx a \cdot C_{acc}$ 이며 그림 1.(b)의 I_G-V_G 곡선과 같은 baseline 사이의 면적이 Q_G 와 일치한다. 이 값은 박막의 이온성분에 의한 것으로 단위면적당 유동이온 전하이고, 아래로 생긴 피크는 공핍전하에 의한 양이 배제된 강유전성에 의한 것으로 단위면적당 분극량($2P_s$)과 같다. 강유전체-게이트 구조에서의 분극전하를 평가하기는 현재로서는 매우 어려움에도 불구하고 강유전체-게이트 구조에서의 유동이온 전하와 분극전하를 TVS법을 통해 동시에 계산할 수 있는 방법을 제안하였다.

III. 결과

III-1 MFIS 구조에 대한 TVS측정결과

$5 \sim 8 \Omega \cdot \text{cm}$ 의 저항율을 갖고 B로 도핑된 *p*-type Si(100)을 이용한 *Pt/SrBi₂Ta₂O₉(200nm)/SiO₂/Si* 구조의 시편에 삼각전압 ramp의 sweep rate(α)를 0.4V/s 로 하여 TVS측정을 행하였다. SiO₂층의 두께는 10nm , Pt 전극의 면적은 $4 \times 10^{-4}\text{cm}^2$ 이다. 그림 2에 실온 및 250°C 각각에 대한 결과를 보였다. 삽입된 그림은 1MHz 및 *Quasistatic* C-V 곡선을 겹쳐 보인 것이다. 그림 2(a)의 $+V_G$ 부근에서 아래로 향하는 피크가 있고, 음의 V_G 부근에서 위로 향하는 피크가 관측되었으며, 이 피크들은 각각 $a \cdot C_{acc}$ 에 해당하는 값이다. 그림 2(b)에서, (-)에서 (+)로 sweep할 때 (-)전압에서 이온의 드리프트에 의한 위쪽으로 향하는 피크가 관측되었으며, baseline 위쪽의 면적에 해당하는 값이 $5.5 \times 10^{11} [\text{ions}/\text{cm}^2]$ 이고, 강유전성에 의한 분극량($2P_s$)에 해당하는 아래로 향한 피크의 면적이 $0.4 [\mu\text{C}/\text{cm}^2]$ 이었다.

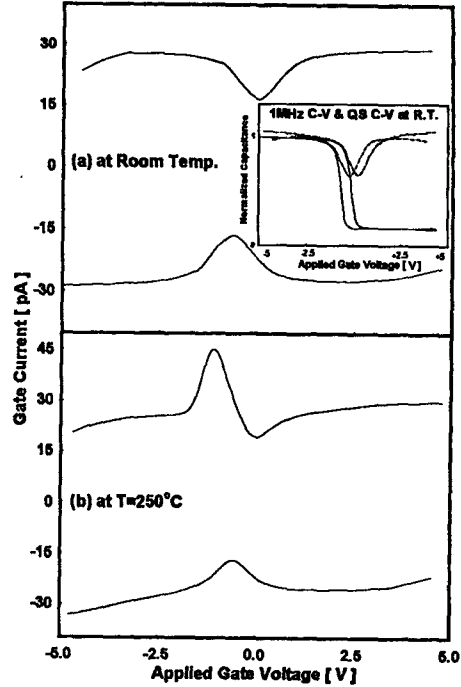


그림 2. 실온 및 250°C 에서의 MFIS(SBT)에 대한 TVS 특성

Fig. 2. TVS characteristics of MFIS(SBT) at R.T. and 250°C

III-2 MFS 구조에 대한 TVS측정결과

MFS구조의 시편으로는 *Pt/LiNbO₃(100nm)/Si* 구조로 역시 $5 \sim 8 \Omega \cdot \text{cm}$ 의 저항율을 갖고 B로 도핑된 *p*-type Si(100)을 사용하였다. Pt 전극의 면적은 $4 \times 10^{-4}\text{cm}^2$ 이다. 그림 3에 실온 및 300°C 각각에 대한 결과를 보였다. 삽입된 그림은 1MHz 및 *Quasistatic* C-V 곡선으로 1MHz C-V에서의 $\pm V_G$ 와 *Quasistatic* C-V에서의 $\pm V_G$ 가 거의 일치함을 보이며, MFIS의 경우보다 게이트 누설전류가 심한 양상을 보이고 있다.

역시 실온에서 양방향의 sweep에 대해 아래와 위로 향한 피크가 관측되었으며 이것은 바이어스에 따른 공핍전하의 변화에 따른 성분과 강유전성의 조합으로 보이며, 300°C 인 그림 3(b)에서의 두 피크

는 공핍전하에 의한 성분은 배제된 강유전성에 의한 분극량($2P_s$)에 해당하는 분극전하에 해당하며 그 값은 $1.4 [\mu C/cm^2]$ 이었다.

그리고, MFIS의 경우와는 달리 (-)에서 (+)로의 전압 ramp의 sweep에 대해서 baseline 위쪽으로 피크가 전혀 나타나지 않았는데, 이는 측정에 쓰인 강유전체 박막의 게이트 누설전류가 박막 내 유동이온의 변위전류에 더해진 것으로 판단된다.

또한, 그림 3에서 보이는 I_G-V_G 곡선의 뒤틀림이 바로 게이트 누설전류에 의한 영향으로 판단된다.

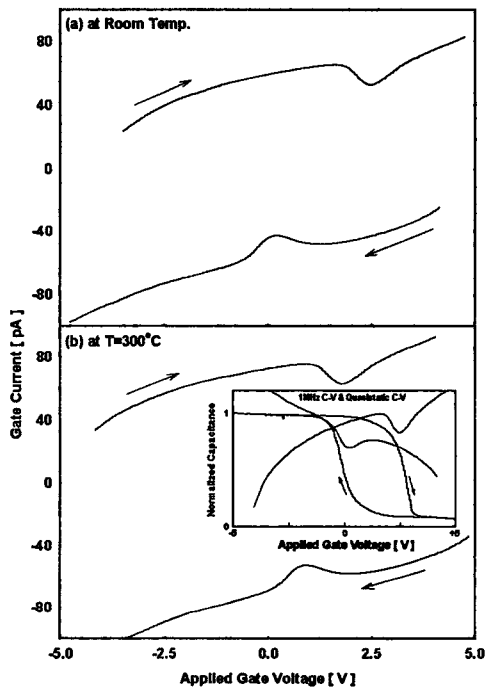


그림 3. 실온 및 300°C에서의 MFS(LiNbO₃)에 대한 TVS 특성

Fig. 3. TVS characteristics of MFS(LiNbO₃) at R.T. and 300°C

IV. 결론

TVS법을 이용한 실리콘 위에 성장시킨 강유전체

박막에서의 분극과 유동전하 밀도를 동시에 검출하는 기법을 제안하였다.

이 기법은 분극 및 이온 변위전류 각각의 피크를 나타내고, 그들의 면적은 각각 총 분극 반전전하 및 총 유동이온 공간전하를 나타낸다. TVS 측정을 통해 계산된 분극량($2P_s$) 및 유동전하 밀도는 각각 SBT(MFIS구조)박막이 $T=250^\circ C$ 에서 $0.4 [\mu C/cm^2]$ 및 $5.5 \times 10^{11} [ions/cm^2]$ 이고, LiNbO₃(MFS구조)박막의 경우 $T=300^\circ C$ 에서 $1.4 [\mu C/cm^2]$ 이었다.

TVS법을 이용한 측정에 있어서 전형적인 변위전류 값의 범위가 수십~수백 pA이기 때문에, 세심한 정전기적인 shielding이 요구되며, 게이트 누설전류가 충분히 적은 양질의 시편이 준비되어야만 한다.

감사의 글

본 연구는 한국전자통신연구원의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

1. M. Yamin, IEEE Trans. Electron Devices, ED-13, 79 (1966)
2. G. Barbottin, A. Vapaille, Instabilities In Silicon Devices, Vol.1, Elsevier Science Publishers B.V., 420, 1996.
3. N. J. Chou, "Application of Triangular Voltage Sweep Method to Mobile Charge Studies in MOS Structures", J. Electrochem. Soc. 118, 601-609, April 1971.
4. E. H. Nicollian and J. R. Brews, MOS(Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology, Wiley, New York, 435, 1981.
5. Dieter K. Schroder, Semiconductor Material and Device Characterization, 2nd Ed., Wiley, New York, 362, 1998.
6. 김용성, 정순원, 김채규, 김진규, 이남열, 김광호, 유병곤, 이원재, 유인규, 양일석, "TVS법을 이용한 강유전체 박막 내에서의 mobile charge 밀도 산출", 한국전기전자재료학회 1999년도 추계학술대회 논문집, pp. 433-436, 1999, 11