

고전계 SiO₂진공계에서 전구섬락 광방출 특성

김 정달, 정 장근, 주 성철, 장 기혁, 이 세훈*, 이 용길**, 김 동희***
경남대학교, *대원전문대학, **동의공업전문대학, ***영진전문대학.

Characteristics of Preflashover Light Emission in High Field SiO₂-vacuum Systems

J.D.Kim, J.G.Jung, S.C.Joo, G.H.Jang, S.H.Lee*, Y.K.Lee**, D.H.Kim***
Kyungnam Univ. *Daewon Technical coll. **Dongueui coll. ***Youngiin Technical coll

Abstract - The preflashover light emission of the SiO₂-dielectric system behavior under high electric field is discussed. Time dependence of the voltage drop, electrical current, and light emission, are analyzed for high-purity SiO₂-vacuum systems under impulse voltage stress. We will summarize the experimental results showing the main feature of the time-dependent system response up to breakdown.

고속스위칭소자의 확실하고 효과적인 실현을 방해하고 있다. 이러한 문제를 극복하고 밀집된 고체상태 전력스위치를 사용하기 위한 유일한 방법중 하나는 고체절연물질(SiO₂나 Si₃N₄등)로 표면을 passivation하는 것으로, passivation된 소자들은 unpassivation된 소자가 주위의 매질 SF₆와 액체유전체에서의 파괴전압값 정도의 매우 높은 값으로 개선되어 기중이나 진공에서 적용할 수 있을 것이다. 고전계 반도체소자를 passivation하면 표면누설전류를 최소화하고 연면방전을 억제시킬 수 있어, 일반 저전계 반도체산업에서는 널리 사용되고 있는 반면 고전계 PCPS로 사용할 때의 정보는 아직 잘 알려지지 않고 있다[4].

1. 서 론

거대한 에너지를 단시간(ps~ms)에 전송하는 펄스파워는 현재 초대형발전기 1TW(1MV×1MA)까지 만들어졌다. Megawatt급 이상의 펄스파워를 전송시키는 시스템 설계를 위해 요구되는 스위치의 특성은 매우 까다롭기 때문에 많은 제한이 수반된다. 펄스파워는 Picosecond jitter, 빠른 펄스상승시간, 펄스폭(ps~ms), 펄스주기(단일펄스~1GHz), 고전압대전류의 전송 등이 요구되기 때문에 기체상태 스위치인 spark-gap 이나 thyatron등은 이러한 요구를 충족시킬 수 없었다. 고전계 반도체(Si, GaAS, Diamond등)는 이러한 난점을 극복할 수 있으며 이들 소자를 이용한 고전계 시스템에 적용되는 스위치가 바로 광전도전력스위치(Photo-Conductive Power Switch : PCPS)이다[1].

본 연구는 SiO₂-vacuum system에서 고전압 임펄스전압이 인가되었을 때 전구방전과정의 중요한 특성을 얻기 위해 전압강하V(t), 전전류(total current) I(t), 광방출 IR(t)를 측정하여 시간함수로 분석해 본 결과 전구방전현상에 대한 중요한 정보를 얻었다.

2. 실험장치 및 실험방법

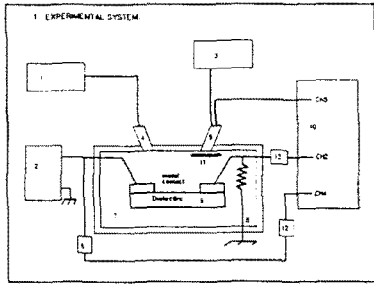
순수 실리콘의 이론적 파괴전압은 300(kV/cm)범위에 있지만 연면방전으로 인한 실질적 파괴전계는 매우 낮아 진공(10kV/cm), 기중(30kV/cm)의 파괴강도를 가지며 SF₆가스 혹은 액체유전체에서는 80~100 kV/cm 정도로 현저히 낮은 값을 가진다[2]. 또 다른 중요한 문제점은 연면방전으로 인한 표면손상과 장기간 사용에 따른 소자의 안정성 확보에 있으며, 연면방전보다 낮은 전계에서 반도체소자에 손상이 있다는 것도 알려지고 있으므로 전구섬락 현상에 관한 연구는 매우 중요하다[3].

실험장치의 구성도는 그림1과 같다. 공급전압은 0.39/3.0[μs]의 임펄스전압원인 Marx Generator가 사용됐다. 적외선과 가시광방출현상은 PMT (Photomultiplier Tube) Hamamatu R928 (185nm~900nm) 감도0.4[V/lm]를 사용하여 고전계 여기상태에서 샘플에 나타나는 광활동을 모니터하였다. 고속디지털오실로스코프는 Tektronix TDS540(샘플링비율 1 GS/s, 대역폭 500MHz)으로 전압, 전류, 광방사파형을 측정하기 위해 사용된다. 조사효과를 알아보기 위해 UV Lamp Type-Model No563108를 사용했다. 소자전류는 50Ω 무유도저항에 의해 측정되며, 284 mV/A의 감도를 가진다. 실험 Chamber는 ~10⁻⁶torr까지 배기되고 1.5[atm]까지 가스압축도 가능하다. 시험샘플은 그림2(a)와 같으며 P형 실리콘35kΩ-cm, 지름25(mm), 두께1(mm)의 웨이퍼를 SiO₂로 미국 Sandia Lab에서 페시베이션하여 경면처리된 것이다. 전극간의 갭은 5(mm)이며

이처럼 연면방전으로 인한 파괴전압의 감소는 매우 심각한 문제이며 특히 펄스파워의 주 응용은 진공상태이므로 더욱 심각하다. 또한 이는 고전계,

중앙에 원형의 공급전압인가용 전극이 있고 사방에 4개의 대향전극을 배치시켰다. 또한 전극 NiCr/Au 접촉은 실리콘을 먼저 상온에서 1분간 5% HF, 45% HNO₃, 50%H₂O용액에서 화학 에칭한 후 20분 동안 비이온화속에서 초음파세척기로 세척하고 600 Å의 NiCr 혼합물층을 100°C로 증착시킨 후 1000 Å의 Au층을 같은 온도에서 증착시켰다.

그림2(b)는 시편전극과 접촉되는 인가전계 공급 전극으로 반구상의 봉전극을 그림과 같이 설치하여 접촉에 의한 부분방전을 피하고 전계상승분포를 완화시킨 구조로 하였다. 진공도는 1.2×10^{-5} [torr]로 진공배기 시스템에서 일정하게 유지된다.



1. UV-lamp power supply	7. Vacuum chamber
2. High-voltage double-exponential pulse generator	8. 50 ohm resistor
3. PMT power supply	9. Dielectric sample
4. UV-lamp	10. Oscilloscope
5. PMT	11. Optical filter
6. HI-voltage probe	12. HI-voltage attenuator
	13. Protector

Fig 1. Schematic diagram of the experimental setup

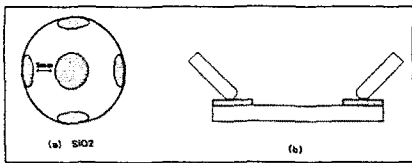


Fig 2. Sample preparation

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고전계 SiO₂의 전구파괴 전류

전구파괴 전류응답을 분류하면 pure ohmic, quasi-ohmic, non-ohmic(개시), non-ohmic 상태로 된다. pure ohmic current는 전류피이크치(I_{max})와 전압피이크치(V_{max}) 사이에 지연시간을 가지지 않고 완전히 같은 위상을 가진다. quasi-ohmic current는 I_{max}와 V_{max}간에 지연시간이 거의 없던지 약간의 지연시간(<150ns)을 가지며 이 경우 대체로 인가전계 35~75(kV/cm)에서 얻어지고 인가전계증가와 더불어 비선형적으로 증가한다. non-ohmic전류는 V_{max}에서 충분한 지연시간(0.5~4μs)를 가진채 개시되고 I_{max}는 quasi-ohmic때보다 낮은 경우도 있으며 긴 시간동안 지속전류가 나

타난다. non-ohmic전류응답으로 충분한 지연시간을 가지고 quasi-ohmic보다 큰 전구파괴 전류응답이 나타난다. 고전계시스템에 사용되는 실리콘소자는 non-ohmic개시전계가 실제 전계의 한계값이 된다. non-ohmic전류가 발생되면 non-ohmic개시 후 전압증가에 따른 전류의 증가율 $\Delta I/\Delta E$ 는 급속한 증가를 보여주며, 고전계스트레스로 인한 누설전류의 불안정한 증가를 나타내고, 고전계에서 강한 광방사를 수반하며, non-ohmic상태에서 시편손상이 관찰된다. 그림3은 SiO₂에서의 V_(t), I_(t), IR_(t)를 인가전계별로 관찰된 것이다. 그림3(a)는 60kV/cm의 인가전계에 의한 V_(t), I_(t), IR_(t)를 보여주며 전류피크(I_{max})가 전압(V_{max})보다 다소 앞선 시간에 나타나서 Pure ohmic current의 특성을 보여준다. 또한 약400ns부근에서 미소한 광신호가 나타남을 볼 수 있다. 그림(b)는 70(kV/cm)인가전계에 의한 V_(t), I_(t), IR_(t)를 보여준다. 250ns부근에서 Non-ohmic전류의 발생과 증가된 IR(t)신호를 볼 수 있다. 그림(c)는 80(kV/cm)인가전계에서 이상 Non-ohmic 전류의 강한 증가와 더불어 전류피이크 200μs부근에서 IR(t)의 강한 광신호가 발생하여 800ns범위까지 분포된 그림을 보여준다. 그림3(d)는 90(kV/cm)인 경우 파괴현상으로 전류지연시간 750ns부근에서 Non-ohmic전류 I(max)의 발생에서 비롯되고 광신호 IR(t)는 600ns부근에서부터 발생하여 I(max)에서 최대신호강도가 나타난다. non-ohmic전류가 발생하여 누설전류가 나타날 때의 전계(이하 E_{non}으로 표기한다.) E_{non}의 값이 60kV/cm로 상승되었으며 Non-ohmic상태에서는 매우 첨예한 전류피이크가 발생하는 현상을 볼 수 있어 페시베이션으로 소자의 고전계 수행능력이 진공에서도 우수한 특성을 보이지만 Non-ohmic상태 이상의 강전계에서는 강한 전류상승을 나타내어 소자손상의 위험은 더욱 증가될 것임을 알 수 있다. 또한 IR(t)의 신호는 전도전류에 관계되므로 광방출특성연구가 필요하다.

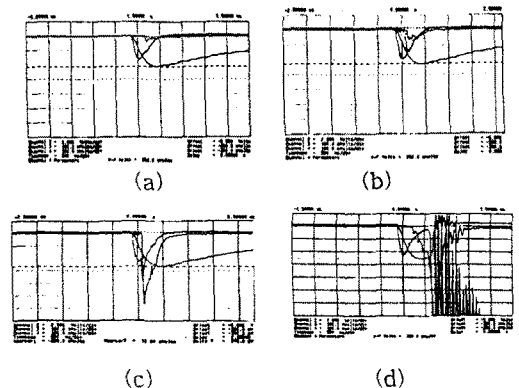


Fig 3 V_(t), I_(t), IR_(t) curve of under high field SiO₂

3.2 자외선(UV) 비조사인 경우 광방사특성

그림4는 인가전압의 크기와 인가회수에 따른 PMT신호강도의 변화를 나타낸 것이다. 펄스전압 인가는 1분간의 간격으로 3회 인가한 경우의 결과로 인가회수 증가에 따라 1·2·3의 순으로 광방출신호의 크기로 감소하는 경향을 보여주고, 인가전압이 증가됨에 따라 광방출신호강도가 커지는 결과를 보여주지만 약25(kV)이상에서는 상승률이 감소하여 포화하는 경향을 나타냈다. 펄스인가 2·3에 대한 광방출신호크기는 전압인가의 대기시간(Waiting Time : WT)차이에 따라 변화되는 것으로 판단되며 대기시간 약8분 이상에서는 1·2·3의 크기가 같게 나타나므로 8분 이상에서의 반복실험으로 결과를 분석해 볼 필요가 있다. 방사광과장을 분석하기 위하여 3가지 광학필터를 이용하여 주방사과장을 점검해 보았다. 그림5는 각 필터의 분광특성에 대한 광신호의 비교분석결과이다.

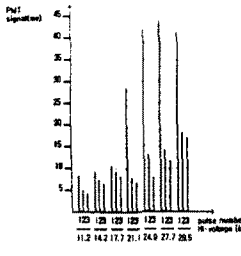


Fig 4. PMT signal response variation for a pulse number

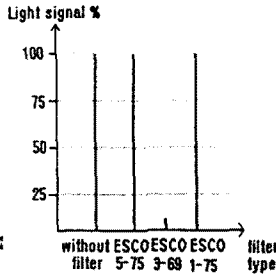


Fig 5. Transmission light signal with different type of filters

ESCO 5-75 와 ESCO 1-75는 필터가 없는 경우와 같게 감지되었으나 ESCO 3-69는 미세한 신호만 감지되었다. 따라서 SiO₂샘플의 주방사과장의 피크는 300~400nm인 것을 알 수 있었다. 광신호의 크기와 WT의 관계를 나타낸 것이 그림 6이다. 30초간격으로 펄스전압을 인가했을 때 인가회수 증가에 따라 최초N1의 크기에서부터 광신호의 크기가 감소하여 최소20mV까지 직선으로 감소하는 특성을 보여주며 다시 최대의 광신호N+1이 나타날 때까지의 관계를 나타냈다. WT변화에 따른 광신호의 변화관계를 알아보기 위해 WT를 1~20분까지 단계별로 실험을 통해 알아본 결과가 그림7이다. WT가 길어짐에 따라 7.5분까지는 증가하지만 그 이후는 급속한 포화현상을 나타낸다, 따라서 최종 N1과 같은 크기의 광신호로 N+1이 될 때까지 평균 WT는 7.5분이다.

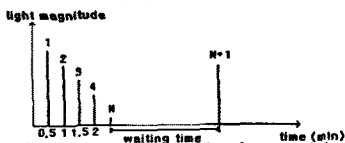


Fig 6. Light magnitude for waiting times

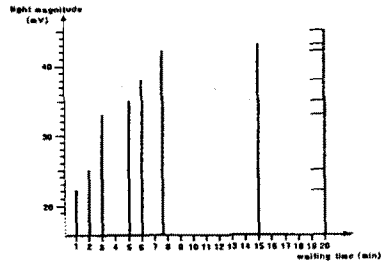


Fig 7. Influence of the waiting time on the light magnitude

3.3. UV를 조사한 경우의 광신호

광전자 방출에 의한 효과를 알아보기 위해 동일한 SiO₂시편에 UV를 3분간 조사한 후 30kV의 일정한 펄스전압을 인가하였을 때 WT변화에 따른 광신호변화를 측정된 결과는 그림8과 같다.

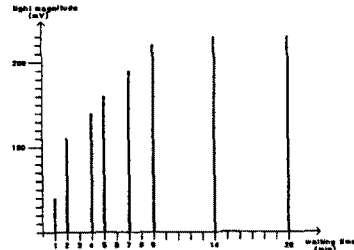


Fig 8. Influence of the waiting time on the light magnitude

광신호강도는 최소WT 1분에서 50(mv)정도의 크기에서부터 약9분까지 증가하여 포화되었다. 이 결과를 비조사인 경우와 비교하면 그림9와 같이 되어 WT이 길어짐에 따라 증가하여 포화되는 경향은 매우 유사하나 광방출신호강도는 매우 커진다는 것을 알 수 있다.

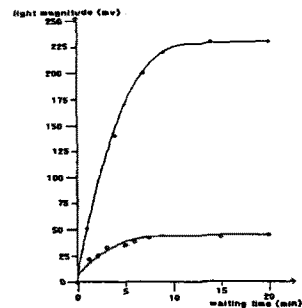


Fig 9. Light magnitude curve with the UV or without UV

그림10은 WT변화에 따른 광방사 발생시간지연의 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 광신호는 1,2의 2개의 성분으로 나타남을 볼 수 있다. WT가 짧은 경우는 지연시간이 400(ns)에서 시작되어 600(ns)까지 1개의 성분만이 나타나지만 WT가 길어짐에 따라 지연시간이 단축되어 2개의 광신호를 나타내고 있다. WT이 가장 긴 9분에서는

200(ns)와 400(ns)사이에서 1개의 성분과 400~600 (ns)사이에 또다른 1개의 광신호가 있음을 알 수 있고 WT이 길어지면 광신호크기가 증가되고 있음도 아울러 나타나고 있다. 그림 11에 WT별로 발생된 광신호가 그림중 (a), (b), (c), (d)의 순으로 변화되는 과정을 보여준다.

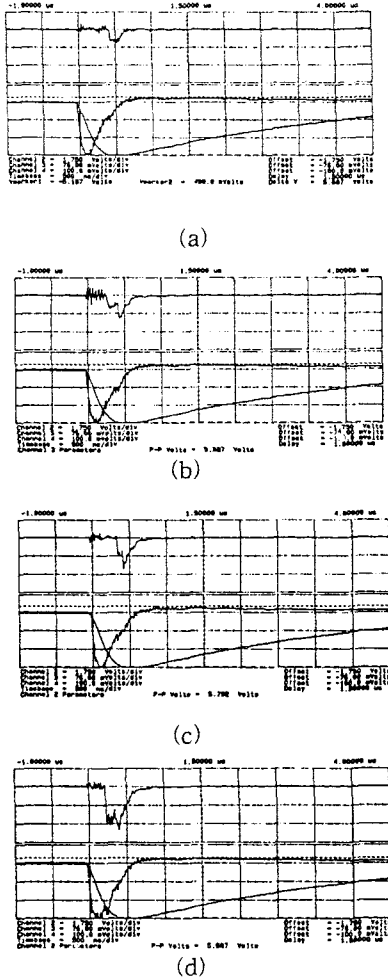


Fig 11. Influence of the waiting time on the light signal

4. 결 론

SiO₂-vacuum system에서 고전압 임펄스전압이 인가되었을 때 전구방전과정의 중요한 특성을 얻기 위해 전압강하V(t), 전전류(total current) I(t)를 측정하여 시간함수로 분석해 본 결과 아래와 같은 결과를 얻었다.

- ① SiO₂의 Enon은 진공중 보통 10kV/cm이지만 페시베이션 후의 Enon은 60kV/cm까지 개선되는 것으로 보아 페시베이션의 탁월한 개선효과가 있다.
- ② UV비조사시 WT는 7.5분, UV조사시 WT는

9분으로 길어지는 특성을 보이며 그 경향은 유사하다.

- ③ 주방사과장의 파이크는 300~400nm이다.
- ④ UV조사시 200~400ns와 400~600ns의 2개의 광신호가 나타난다.

(참 고 문 헌)

- [1] W. C. Nunnally, "Photoconductive Pulsed Power Switches: A Review", Proceedings of the 5th IEEE Pulsed Power Conference, pp. 235-241, Arlington, VA, 1985.
- [2] G. M. Loubriel, M. W. O'Mally, and F.J.Zutavern, "Toward Pulsed Power Uses for Photoconductive Semiconductor Switches: Closing Switches," in Digest of Technical Papers, 6th IEEE Pulsed Power Conference, P. H. Turchi and B. H. Bemstein eds.(IEEE, New York, 1987), pp.145-148
- [3] B. L. Thomas and W. C. Nunnally, "Recent Developments in the Investigation of Surface Flashover on Silicon Photoconductive Power Switches", Proceedings of the 7th IEEE Pulsed Power Conference, Monterey, CA, pp. 890-896, 1989.
- [4] W. R. Runyan, K. E. Bean, Addison-Wesley Publishing Company Semiconductor Integrated Circuit Processing Technology, 1990.