

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560336

研究課題名(和文)複合励起形沿面放電発光デバイスの可能性に関する研究

研究課題名(英文) Investigation of possibility of light emitted device using multiple excitations by surface discharge

研究代表者

上野 秀樹 (UENO, HIDEKI)

兵庫県立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90301431

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：フラットケーブルによる背後電極付きの誘電体板上の沿面放電挙動と発光特性について検討を行った。負極性沿面ストリーマの進展速度が、正極性沿面ストリーマの進展速度に比べて、大きくなることを見出した。これは負極性ストリーマの進展において、ストリーマ先端から放出される紫外線による光電子放出、ストリーマ先端に存在する高エネルギーを有する電子による固体誘電体からの電子放出などの固体誘電体から電子が供給されることで説明でき、これは紫外光励起および電子励起の複合励起の可能性が示唆されるものである。このことから本目的の複合励起型沿面放電による発光デバイス、ディスプレイの可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：Surface discharge behavior and light emission properties for the configuration with two plane electrodes on the dielectric plate with a flat cable backside electrode have been investigated. In the case of negative polarity, surface discharge developed from the HV electrode (cathode) to the grounded electrode (anode). The extension of the negative surface streamer is significantly faster than that of positive surface streamer. These results suggest that electrons with high energy are included in the negative surface streamer head and the photoemission and the secondary emission play important role in the negative streamer extension. It suggests that devices using multiple excitation such as by UV radiation and electrons with high energy from streamer should be possible.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：沿面放電 希ガス ディスプレイ 電力工学 電気機器工学

1. 研究開始当初の背景

電極間に異種固体誘電体が介在した放電形態には、バリア放電と沿面放電の二つのものが知られている。バリア放電は、電極間の固体誘電体層に仕切られた空間で発生するパルス状の放電であり、古くからオゾナイザや NO_x 等の環境汚染物質の除去装置に利用されている。特に、プラズマディスプレイへの応用は、バリア放電の利用技術の進展の代表例である。一方、後者の沿面放電は、電極間に存在する異種誘電体の界面（例えばガス/固体、油/固体）に沿って発生・進展する放電である。従来、この種の放電は、高電圧機器、碍子などの電力機器・設備において、絶縁破壊を引き起こす原因であることから、沿面放電に関する研究は、如何に沿面放電の発生を防ぐか、発生した沿面放電の進展を抑制するかに、主眼が置かれてきた。そのため、沿面放電における新たな物理現象の発見やその応用に関する積極的な研究は、最近まで進んでいなかった。沿面放電の工業的応用は、オゾナイザや NO_x 等の有害物質処理、あるいはプラグなど限られた範囲に留まっており、バリア放電に比べて遅れている。沿面放電における物理現象の解明と応用を促進するためには、これまでとは別の観点から沿面放電に関する研究を行うことが不可欠である。

2. 研究の目的

沿面放電は電極間に存在する異種誘電体の界面に沿って発生・進展する放電であり、ほとんどの場合、沿面放電は一方の電極の一点あるいは複数ヶ所から、直線的あるいは樹枝状・放射状に細い放電路を形成し、進展する。すなわち、沿面放電により発生する荷電粒子密度は、その放電路中では高いが、放電路以外では低い。したがって、放電路の荷電粒子とそのエネルギーによる放電化学反応や再結合や脱励起による発光の効率は高いが、誘電体界面全体でみた場合、その効率は必ずしも高くない。電極間の誘電体界面全体に均一な面状沿面放電を発生させることができれば、それを用いた反応や発光の効率は大幅に向上させることが可能と考えられる。

沿面放電の発生と進展を抑制する研究は多いが、本研究で取り組もうとする課題、すなわち発生する沿面放電の形態自体を制御し、利用しようとする試みは、ほとんど例をみない。大型化可能なプラズマディスプレイに応用されているバリア放電は、基本的にはガス中放電である。一方、沿面放電は、条件によっては、ガス中放電やバリア放電に比べ、発生、進展が容易に行われる場合があり、沿面放電を制御し、均一・高輝度の面状発光が実現できれば、液晶や EL さらには従来のプ

ラズマディスプレイを凌ぐ新規な発光デバイスの可能性を秘めている。

我々はこの観点から研究を展開しており、電極構成（特に背後電極）やガス圧力などの各種パラメータを検討し、これらの条件をコントロールすることにより、線状沿面放電（1次元）、面状沿面放電（2次元）および面状沿面放電に加え空間に広がる放電の共存する放電（3次元）が実現できることを示した。そして、得られた面状沿面放電による可視発光を利用して、発光デバイスの試作を行い、面状沿面放電を利用した発光デバイスが原理的に可能であることを実証した。しかしながら、目視できるレベルの輝度を有した面発光が得られたものの、その輝度は未だ低く面発光デバイスとして実用レベルには至っていない。

本研究では、従来の成果をもとにさらに発展させ、沿面放電の制御技術の確立と高輝度面状発光の実現を目指す。沿面放電の発生時においては、広い波長域の発光が放射されているが、これまで行ってきた面発光の研究においては、紫外域から可視・赤外域までの広い波長域での沿面放電発光を確認している。そして、直接的な可視域の発光に加えて紫外域の発光とそれによる蛍光体励起による可視発光に焦点を当ててきた。また、特に沿面放電空間の制限による封じ込め、紫外光増強や紫外光による電子放出など2次的な効果を期待した検討を行ってきた。これらの試みは、放電を利用したデバイスにおいては例を見ない独創的なものと考えている。さらに、沿面放電における高エネルギー電子をも発光の励起源として活用することも可能とも考えられる。本研究課題では、このような可視のみならず、紫外光とその増強光、高エネルギー電子などの複合励起による発光を利用し、面発光デバイスとして実用可能なレベルの輝度の実現の可能性を検討し、また高効率・低消費電力化への知見を得ようとするものである。

3. 研究の方法

我々はこれまでに、固体誘電体上に逆極性の残留電荷により沿面放電が進展しやすいと考えられる交流電圧を用いることにより、フレキシブルフラットケーブルによるストライプ状背後電極を有する平行電極構成において、固体誘電体沿面に比較的大きく広がった放電発光が観測されることを見出した。これを発光デバイスに利用することを目的として、交流電圧印加時の沿面放電の進展やその放電発光に関する検討を行ってきた。特に、沿面放電形態に大きく影響を及ぼすと予想されたパラメータである、ガス圧力、ストライプ状背後電極の幅、印加電圧に着目して検討を行い、面状沿面放電とそれに隣接するガス空間での放電発光を発生させるに至った。さらに、得られた面状沿面放電による可

視発光を利用して、発光デバイスの試作を行い、面状沿面放電を利用した発光デバイスが原理的に可能であることを実証した。しかしながら、目視できるレベルの輝度を有した面発光が得られたものの、その輝度は未だ低く面発光デバイスとして実用レベルには至っていない。本研究では、得られた沿面放電における、紫外から赤外までの発光のうち、特に紫外光効率的な発生条件とその紫外光の増強、さらには沿面放電における沿面ストリーマ、沿面リーダ中の高エネルギー電子に着目し、これらによる複合励起発光を目指し、面状沿面放電発光の輝度が低いことなどの問題を克服するための基本的取り組み方法とした。

4. 研究成果

電圧印加時間と休止時間(stop time)の比を変えることで、発光強度を制御することを想定し、図1の電圧印加時間1Cycleに対する休止時間の比を0, 1, 4, 9, 19Cycleと変化させた。また、パルス1Cycleの長さを10 μ s, 5 μ s, 3.3 μ sと変化させ、放電開始電圧の変化を記録した。この結果を図1に示す。

図1においてstop time=0 Cycleは1周期10 μ sの方形波を意味する。図1より stop

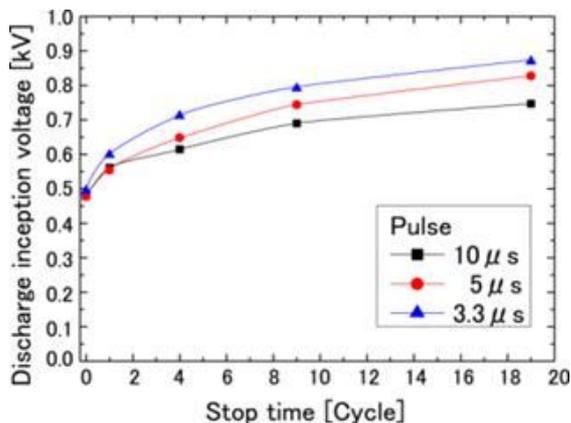


図1 放電開始電圧-休止時間

time=0 Cycleの条件では、いずれのパルス幅でも放電開始電圧が0.5kV以下であるのに対し、stop time=4 Cycleとした条件では、10 μ s, 5 μ s, 3.3 μ sの各パルス幅において放電開始電圧が0.61kV, 0.65kV, 0.72kVと上昇している様子が見られた。さらに stop time=19 Cycleとした条件では、10 μ s, 5 μ s, 3.3 μ sの各パルス幅において0.75kV, 0.83kV, 0.87kVに上昇した。この結果から、電圧印加の休止時間が長くなると放電開始電圧が上昇する傾向があることがわかる。また、よりパルス幅の短い5 μ sや3.3 μ sの条件

ではパルス幅10 μ sよりもこの傾向が強く現れていると言える。

パルス幅10 μ sの条件で、休止時間を変化させた際の放電の様子を、側面からデジタル一眼レフカメラにより撮影した写真を図2に示す。ただし撮影条件は露光時間1/350s, 絞り2.8, ISO感度1600であり、放電ガス条件は混合比Ne100%, ガス圧100kPaである。図2(a)のStop time=0 Cycleでは放電路が誘電体表面に対して垂直の方向に拡散している様子が見電極および接地電極の近傍では強い橙色の発光が見られた。図2(b)のStop time=1 Cycleの条件では、Stop time=0 Cycleの場合と比べて拡散の程度が小さくなり、目視における発光の明度は増した。また、発光色は赤紫色に変化した。高压電極および接地電極の近傍ではStop time=0 Cycleの場合と同様に強い橙色の発光が見られた。図2(c)のStop time=4 Cycleでは放電路が拡散せず、誘電体表面に沿って細く伸びる様子が見られた。また、放電路の発光は全体的に強い橙色となり、高压電極および接地電極の近傍が、放電路よりもわずかに明るく発光した。図2(d)のStop time=9および19 CycleではStop time=4 Cycleと同様に、放電路が拡散せず、誘電体表面に沿って細く伸びる様子が見られた。このときの発光色は放電路全体的に橙色となり、Stop time=0, 1および4 Cycleで見られた電極近傍での発光は弱まった。

これらの放電における発光強度を色彩輝度計(TOPCON, BM-7A)により数値化したものを図3に示す。輝度の観測は高压電極および接地電極の中間点上を誘電体に垂直な方向からスポットサイズ1mmで観測した。この結果から、放電路の拡散が見られるStop time=0および1 Cycleの条件ではStop timeが増加するにつれて、放電路の発光強度も強くなるのが分かる。これに対して、放電路の拡散が見られないStop time=4, 9および19 Cycleの条件では休止時間が長くなるにつれて、放電路中心部の発光強度も低下していく様子が見られた。

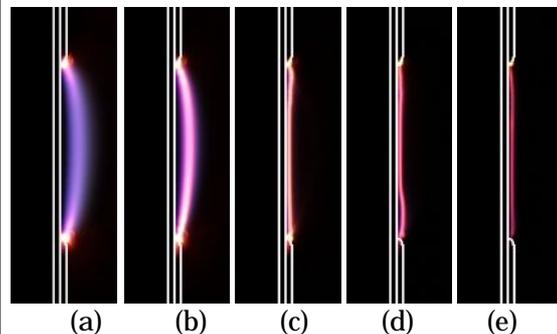


図2 放電の様子

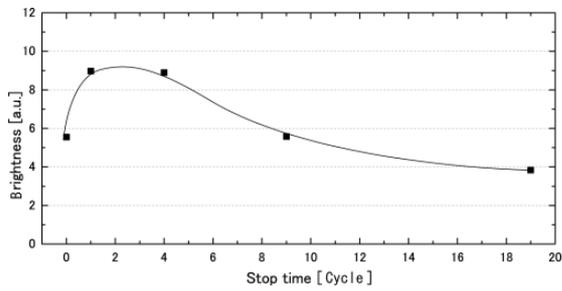


図3 放電路の輝度(相対値)-休止時間

ICCD カメラによって沿面放電伸展の過程を観測し、発光状態の変化を知ることにより、より均一で安定した発光を実現する方法を検討する。上述での観測より、パルス幅 10 μ s の条件において、Stop time=0 および 1Cycle では、グロー状の放電が継続しており沿面放電の伸展過程を撮影することは困難であった。Stop time=4 および 9 Cycle においても、前回の放電によるアフターグローが残留した状態で次の放電が開始するため、放電が伸展する様子は見られなかった。今回の報告では Stop time=19 Cycle として Ne に対する Xe の混合比 2% の条件で沿面放電を発生させた。微少な放電電流を検出した瞬間を基準点として、0ns から 2000ns まで間の放電伸展の様子を電極側面から、ICCD カメラにより露光時間 20ns、撮影間隔 50ns で撮影した。

負極性高電圧を高圧電極に印加した際の、電圧・電流波形を図 7(a) に示す。図 4(a) の波形において時間軸 0 μ s 以前に見られるピーク値 4mA の電流は、放電に依存せず、印加電圧に比例して常に流れている電極系の充電電流である。

本報告に記載する伸展機構観測の範囲を図 4(a) 中に観測範囲として示す。この範囲において電流波形を拡大したプロットを図 4(b) に、撮影した ICCD カメラの画像を図 5 に示す。なお、図 4(b) において灰色の網掛け部は ICCD カメラの露光時間を示している。

これらの結果から、電流と放電発光の関係を見る。放電開始直後の 0ns から図 5(vi) の 300ns までは、放電電流は 1mA から 3mA の値で減少傾向を示しながら推移しており、放電発光は高圧電極から接地電極へ向けて帯状の発光領域が伸びていく様子が見られる。図 5(vi) の 300ns から図 5(viii) の 400ns の間では、高圧電極から伸展してきた発光領域が接地電極に到達し、さらに明るい領域が接地電極側から高圧電極へ向けて伸展していく様子が見られる。同時に電流が徐々に増え始める。図 5(ix) の 450ns 以降では、放電路全体が明るく発光し始め、電流も急激に増加してゆく様子が見られる。さらに 1000ns 以降になると電流が減少し、発光領域は高圧電極近傍に偏った状態になることが確認されている。

正極性高電圧を高圧電極に印加した際の、電圧・電流波形および伸展機構の観測範囲を図 6(a) に示す。観測範囲の電流波形を拡大し

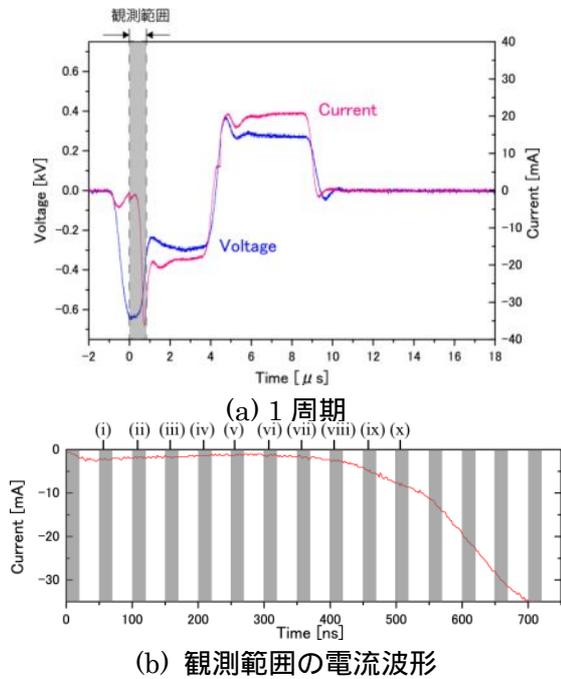


図4 負極性放電の電圧・電流波形

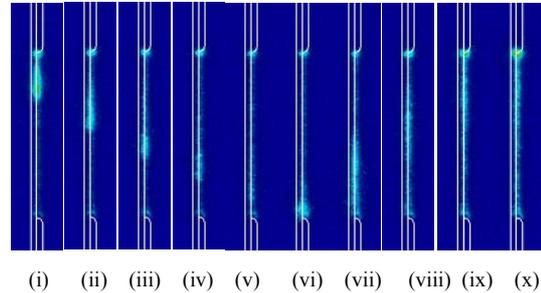


図5 負極性放電伸展の様子

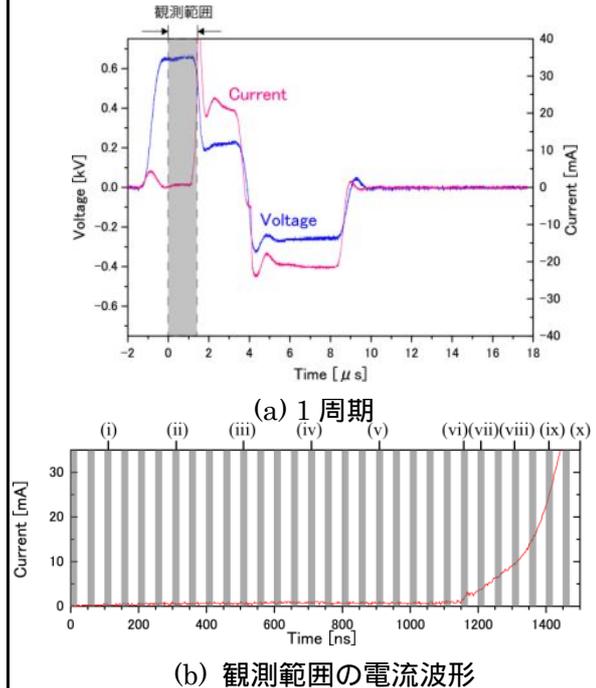


図6 正極性放電の電圧・電流波形

たものを図 6(b) に示す。また、ICCD カメラの画像を図 7 に示す。この結果から、正極性での放電開始時に見られる電流と放電発光

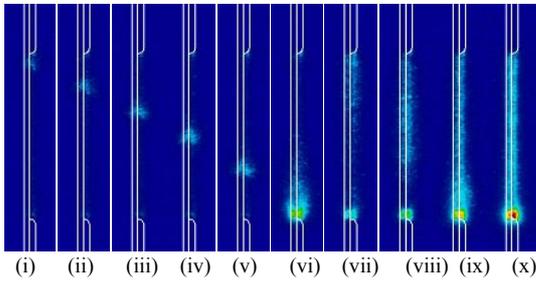


図7 正極性放電伸展の様子

の関係を検討する。放電開始後 0ns から 1100ns の間では、1mA 程度の放電電流が持続し、放電発光は点状の発光部が高圧電極から接地電極へ向けて移動していく様子が見られる。1100ns および図 7(vi)の 1150ns の観測では、点状の発光部が接地電極に到達し、接地電極近傍が強く発光すると同時に、電流は増大し 4mA となった。図 7(vii)の 1200ns から 1350ns では発光部が再度、高圧電極側から接地電極側へ向けて伸展する様子が見られ、放電電流は急激に増加した。1400ns 以降では高圧電極から伸びた発光部が接地電極に到達し、放電路全体が明るく発光すると同時に、電流がさらに増加していった。放電開始後 1700ns 以降では電流が減少し、発光領域は接地電極近傍に偏った状態になった。

正負両極性ともに、高圧電極から接地電極へ向けて発光領域が伸展した後、正極側から負極側へ向けて再度発光領域が移動し、負極へ発光が到達した直後から急速に電流が増加して放電路全体が発光する様子が見られた。しかし、放電路全体が発光してから約 300ns で電流が減少し、負極近傍のみが発光する偏った発光状態となった。このことから、パルス幅を設定する際に、偏った発光となる時間よりも短く設定することで、より偏りの少ない発光が得られる可能性がある。また、同様の電圧条件では正極性で立ち上がる放電の伸展に比べて負極性で立ち上がる放電の伸展の方が速い傾向が見られた。

Ne ガスへの Xe ガスの混合量を変化させて検討を行った結果を図 8 の沿面放電進展速度と Xe 混合量の関係として示した。検討を行

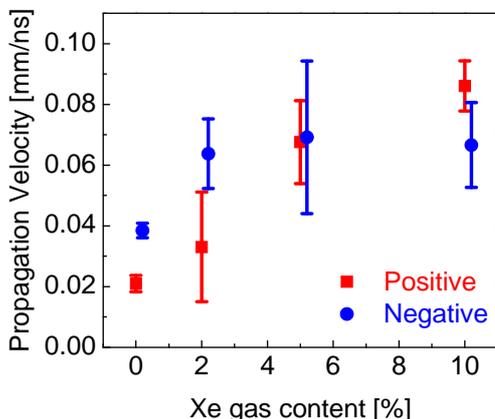


図8 沿面放電進展速度と Xe 混合量

ったほすすべての Xe ガスの混合比において正極性に比べて、負極性の沿面放電のほうが速く進展することが分かった。

通常の気体放電では、光電離による飛火作用により負極性に比べて、正極性の放電の進展速度が速いことが知られている。しかし、本研究によって得られた希ガス中の沿面放電における結果は全く異なっている。沿面放電においては、ガスの電離過程のみならず、その電離気体と固体誘電体との相互作用が関係しており、面状沿面放電の発生・進展メカニズムおよび放電発光メカニズムを正確に把握することが必要である。沿面放電進展過程について、実験的手法により放電電流等の電気的計測、発光計測とその対応の検討を本研究では行い、沿面放電の進展においては、負極性沿面ストリーマの進展速度が、正極性沿面ストリーマの進展速度に比べて、大きくなることは、負極性ストリーマの進展において、ストリーマ先端から放出される紫外線による光電子放出、ストリーマ先端に存在する高エネルギーを有する電子による固体誘電体からの電子放出などの固体誘電体から電子が供給されることで説明でき、これは紫外光励起および電子励起の複合励起の可能性が示唆されるものである。

さらに、Xe や Ne ガス中の電子の平均自由行程、先端電界などのパラメータについて理論的考察を行った。

電子の平均自由行程の分布は次式で表される。

$$f(x)dx = \frac{dG(x)}{G_0} = \frac{1}{\lambda_e} e^{-\frac{x}{\lambda_e}} dx = e^{-y} dy$$

$$(y = \frac{x}{\lambda_e})$$

$$\int_{x=\lambda_e}^{\infty} \frac{dG(x)}{G_0} = \int_1^{\infty} e^{-y} dy = e^{-1} = 0.368$$

これより、 λ_e より長い自由行程の電子の存在が 36.8%となる条件を考える。ここで、 $y=5$ として考えてみる($x=5\lambda_e$ で 5 倍の自由行程を持つ電子を考える)と、 $e^{-5} \approx 0.007$ となり、0.7%の電子が $5\lambda_e$ 以上の行程を持つ。これらの電子が持つエネルギーを Ne, 760Torr および Xe, 76Torr の条件で、沿面放電のストリーマ径が数 μm ~10 μm 程度とすれば、Ne(760Torr)中では、8.1eV 以上のエネルギーを持つ電子が、Xe(76Torr)中では 30eV 以上のエネルギーを持つ電子が、0.7%存在することが予想される。

以上のことから、ガス中での沿面ストリーマ先端の電子が、固体誘電体からの電子放出を引き起こすことが可能なレベルのエネルギーを持つ可能性も示唆された。

そこで、紫外線励起および電子線励起の複合励起の可能性をさらに実験的に検討するため、電子線/紫外線の複合励起に対応した蛍光物質の探索を行い、ZnS 系および Y2O2S

系の白色発光無機蛍光体を選定し、沿面放電の進展する固体誘電体表面への形成を試みた。

上記の実験的、理論的検討より、本研究の目的である、紫外光励起および電子励起の複合励起の可能性が示唆されたと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

H.Ueno, T.Okuda, K.Hayashi and S.Okada: Surface Discharge and Light Emission Properties on Dielectric Plate with Strip Backing Electrode in Ne/Xe Mixtures, High Voltage Engineering, 査読有, Vol.38, pp.340-343 (2012)

〔学会発表〕(計 14 件)

奥田知広, 上野秀樹: Ne/Xe 混合ガス中での繰返しパルス駆動における沿面放電の発光特性, 平成 23 年電気学会基礎材料共通部門大会, No.XIII-5, 2011 年 9 月 21 日, 東京工業大学

H.UENO, T. OKUDA, K.HAYASHI: Surface Discharge and Light Emission Properties on Solid Dielectric Plate with Strip Backing Electrode in Ne/Xe Mixtures, Proceedings of 5th International Conference on Electrical and Electronic Materials Engineering (ICEME 2011), 2011 年 12 月 3 日, 大阪 中央電気倶楽部

H.Ueno, T.Okuda, K.Hayashi, S.Okada, Surface discharge and light emission properties on dielectric plate with strip backing electrode in Ne/Xe mixtures, The XIXth International Conference on Gas Discharge and Their Applications, 2012 年 9 月 2~7 日, 中国 北京

岡田 翔, 奥田知広, 上野秀樹, Ne/Xe 混合ガス中パルス電圧下における沿面放電の進展挙動, 平成 24 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, No.XII-2, 2012 年 9 月 20, 21 日, 秋田大学

奥田知広, 岡田 翔, 上野秀樹, 背後電極を用いた沿面放電の挙動観測, 平成 24 年電気関係学会関西連合大会, P-41, 2012 年 12 月 8 日, 関西大学

岡田 翔, 奥田知広, 上野秀樹, Ne/Xe 混合ガス中における沿面放電の発光特性, 平成 24 年電気関係学会関西連合大会, 9amH-6, 2012 年 12 月 9 日, 関西大学

岡田 翔, 奥田知広, 上野秀樹, 希ガス雰囲気中でのパルス電圧印加時における沿面放電の観測, 電気学会放電研究会, ED-12-157, 2012 年 12 月 15 日, 兵庫県立大学

岡田 翔, 永田渉, 藤井愛理, 上野秀樹, 繰返しパルス電圧印加時における沿面放電の経時変化, 平成 25 年電気学会全国大

会, 1-153, 2013 年 3 月 20~22 日, 名古屋大学

岡田 翔, 上野秀樹, 希ガス中における沿面放電の挙動, 電気学会パルスパワー・放電研究会, ED-13-095, 2013 年 10 月 24, 25 日, 熊本大学

岡田 翔, 上野秀樹, 背後電極を用いた沿面放電の諸特性, 2013 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, No.12-E-a2-4, 2013 年 9 月 13 日, 横浜国立大学

岡田 翔, 上野秀樹, パルス電圧印加時の沿面放電路の形成, 平成 25 年電気関係学会関西連合大会, P-24, 2013 年 11 月 16 日, 大阪電気通信大学

岡田 翔, 清水裕太, 上野秀樹, 背後電極設置型電極を用いた沿面放電路形成に関する検討, 第 288 回電気材料技術懇談会, 288-3, 2013 年 7 月 11 日, 大阪大学

岡田 翔, 上野秀樹, パルス電圧印加時の沿面放電進展速度計測, 平成 26 年電気学会全国大会, 1-076, 2014 年 3 月 18~20 日, 愛媛大学

S.Okada, H.Ueno, Propagated velocity of surface discharge in Ne/Xe mixtures, The XXth International Conference on Gas Discharge and Their Applications, 2014 年 7 月, フランス オルレアン大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

特記事項なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上野 秀樹 (UENO, Hideki)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 90301431

(2) 研究分担者

岡田 翔 (OKADA, Sho)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 90633123

(3) 連携研究者

なし