

Technologie Generowania Plazmy Niskotemperaturowej

Szczegóły Konstrukcyjne i Przegląd Rozwiązań

Opracowanie Techniczne

1 lutego 2026

Streszczenie

Niniejszy dokument stanowi techniczny opis metod generowania plazmy niskotemperaturowej (tzw. zimnej plazmy). Dokument koncentruje się na szczegółach inżynierskich reaktorów DBD, dysz plazmowych oraz układów rezonansowych typu Kacher Browina. Przedstawiono przykłady komercyjnych urządzeń medycznych i przemysłowych oraz zamieszczono poprawny schemat ideowy generatora w układzie Browina.

Spis treści

1 Wstęp	1
2 Wyładowanie Barrierowe (DBD)	2
2.1 Szczegóły Konstrukcyjne	2
2.2 Przykłady Rozwiązań i Urządzeń	2
2.3 Zaawansowane Modyfikacje: Elektrody Tekstylne	3
3 Dysza Plazmowa (Plasma Jet)	4
3.1 Szczegóły Konstrukcyjne	4
3.2 Przykłady Urządzeń Komercyjnych	4
4 Kacher Browina (Układ Rezonansowy)	5
4.1 Zasada Działania i Specyfika	5
4.2 Schemat Ideowy (Wektorowy)	5
5 Bibliografia i Źródła	5

1 Wstęp

Plazma niskotemperaturowa (CAP) znajduje zastosowanie tam, gdzie wymagana jest wysoka reaktywność chemiczna przy zachowaniu niskiej temperatury gazu nośnego ($< 40^{\circ}\text{C}$). Kluczem do efektywności jest dobór odpowiedniej topologii układu generującego.

2 Wyładowanie Barrierowe (DBD)

2.1 Szczegóły Konstrukcyjne

Reaktory DBD (Dielectric Barrier Discharge) charakteryzują się obecnością co najmniej jednej warstwy dielektryka w torze prądowym.

- **Dielektryki:** Najczęściej stosuje się szkło borokrzemowe, kwarc, ceramikę kordierytową (Al_2O_3) lub polimery (Kapton, Teflon). Grubość bariery wynosi zazwyczaj od 1 do 3 mm.
- **Szczelina wyładowcza:** Odległość między elektrodami jest krytyczna i wynosi od 0.1 mm (dla ozonatorów) do kilku mm.
- **Chłodzenie:** W rozwiązaniach przemysłowych o dużej mocy (powyżej 500 W) stosuje się chłodzenie cieczą (woda dejonizowana przepływająca przez elektrody) lub wymuszone chłodzenie powietrzem, aby zapobiec degradacji dielektryka.
- **Zasilanie:** Falowniki rezonansowe pracujące w zakresie 1 – 100 kHz. Napięcia rzędu 5 – 30 kVpp.

2.2 Przykłady Rozwiązań i Urządzeń

Technologia DBD jest szeroko stosowana w przemyśle ciężkim i precyzyjnym. Poniżej przedstawiono szczegółowe przykłady wdrożeń:

1. Wielkoskalowe Generatory Ozonu (Uzdatnianie Wody):

- *Przykład:* Systemy **Wedeco (Xylem)** lub **Ozonia**.
- *Zastosowanie:* Miejskie oczyszczalnie ścieków i stacje uzdatniania wody.
- *Opis techniczny:* Reaktory te składają się z tysięcy rur dielektrycznych (często szklanych) umieszczonych w płaszczu wodnym (stal nierdzewna). Tlen przepływa przez szczelinę wyładowczą, gdzie mikrowyładowania przekształcają go w ozon (O_3). Wydajność takich systemów sięga setek kilogramów ozonu na godzinę.

2. Aktywacja Foliai "Corona" (Przemysł Opakowaniowy):

- *Przykład:* Urządzenia firm **Softal**, **Vetter**, **Meisenbach**.
- *Zastosowanie:* Przygotowanie folii polimerowych (PE, PP, PET) do druku i laminowania.
- *Opis techniczny:* Polimery mają naturalnie niską energię powierzchniową (są hydrofobowe), co utrudnia przyczepność farb. Wałek pokryty dielektrykiem (silikonem lub ceramiką) przesuwając folię pod elektrodą WN. Plazma powietrzna utlenia powierzchnię folii, tworząc grupy karboksylowe i hydroksylowe, co drastycznie zwiększa jej zwilżalność (napięcie powierzchniowe wzrasta z ok. 30 do ponad 40 dyn/cm).

3. Motoryzacja (Klejenie Reflektorów):

- *Przykład:* Systemy **Tantec** (np. PlasmaTEC-X).
- *Zastosowanie:* Uszczelnianie i klejenie kloszy reflektorów samochodowych.
- *Opis techniczny:* Przed nałożeniem kleju poliuretanowego, rowek w obudowie reflektora (często wykonany z polipropylenu) jest traktowany głowicą DBD profilowaną do kształtu detalu. Zapewnia to hermetyczność połączenia i odporność na wibracje przez lata eksploatacji.

4. Oczyszczanie Gazów Przemysłowych (De-NOx / De-SOx):

- *Zastosowanie:* Elektrownie i spalarnie odpadów.
- *Opis techniczny:* Reaktory DBD montowane w kominach. Wysokoenergetyczne elektrony w plazmie rozbijają cząsteczki tlenków azotu (NO_x) i siarki (SO_x), które następnie reagują z dodanym amoniakiem, tworząc stałe sole (np. azotan amonu), łatwe do odfiltrowania w elektrofiltrach.

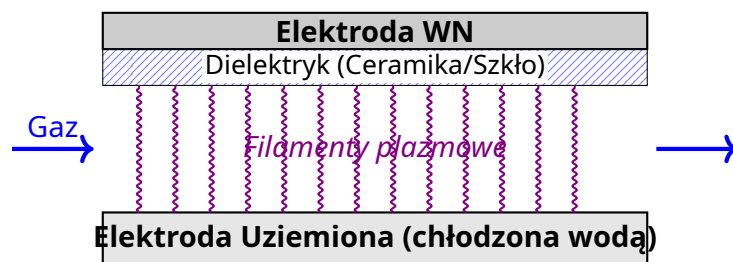
5. Produkcja Taśm Kompozytowych Kapton (Poliimidowych):

- *Problem:* Folie poliimidowe (Kapton®) charakteryzują się doskonałą odpornością termiczną i elektryczną, ale posiadają skrajnie niską energię powierzchniową, co uniemożliwia trwałe łączenie ich z innymi materiałami.
- *Proces:* Zastosowanie wyładowania barierowego (DBD) w atmosferze powietrza lub azotu prowadzi do funkcjonalizacji powierzchni poprzez "szczepienie" grup polarnych (hydroksylowych -OH, karboksylowych -COOH) oraz nanostrukturyzację powierzchni (zwiększenie chropowatości w skali nano).
- *Zastosowanie Przemysłowe:*
 - **FCCL (Flexible Copper Clad Laminate):** Niezbędny proces przy produkcji elastycznych obwodów drukowanych, umożliwiający bezpośrednie napylenie lub laminowanie miedzi na poliimid bez użycia klejów (tzw. laminaty bezklejowe), co poprawia właściwości dielektryczne przy wysokich częstotliwościach.
 - **Przemysł Lotniczy:** Produkcja kompozytowych taśm izolacyjnych (Kapton + FEP/PTFE) do owijania wiązek kablowych, gdzie plazma zapewnia integralność warstw w ekstremalnych warunkach termicznych.

2.3 Zaawansowane Modyfikacje: Elektrody Tekstylne

W nowoczesnych układach badawczych rozważa się zastąpienie litych elektrod metalowych materiałami o rozwiniętej powierzchni właściwej.

- **Koncepcja:** Użycie aktywowanej tkaniny węglowej (carbon fabric) jako elektrody WN.
- **Problem izolacji:** Bezpośrednie użycie tkaniny przewodzącej w układzie DBD wymaga bariery dielektrycznej. Tradycyjne dielektryki (płyty szklane) niwelują zaletę faktury tkaniny, tworząc płaską barierę.
- **Rozwiązanie (Powłoki Konforemne):** W celu zachowania "rozwiniętej powierzchni" dielektryka, na tkaninę węglową nakłada się cienką warstwę izolatora, która idealnie odwzorowuje kształt włókien.
 - **Teflon (PTFE):** Trudny do nałożenia cienką warstwą bez zalewania mikroporów. Wymagałby zaawansowanych metod polimeryzacji plazmowej.
 - **Parylen (Parylene C):** Nakładany w procesie CVD (Chemical Vapor Deposition). Pozwala uzyskać szczelną warstwę dielektryczną o grubości rzędu 10–50 μm na każdym pojedynczym włóknie tkaniny.
- **Zaleta fizyczna:** Taka konstrukcja powoduje silne, lokalne wzmocnienie pola elektrycznego na krzywiznach powlekanych włókien węglowych. Ułatwia to zapłon wyładowania przy niższym napięciu oraz generuje gęstą sieć mikrowyładowań na powierzchni odwzorowującej splot tkaniny.



Rysunek 1: Przekrój reaktora DBD z zaznaczonym przepływem gazu.

3 Dysza Plazmowa (Plasma Jet)

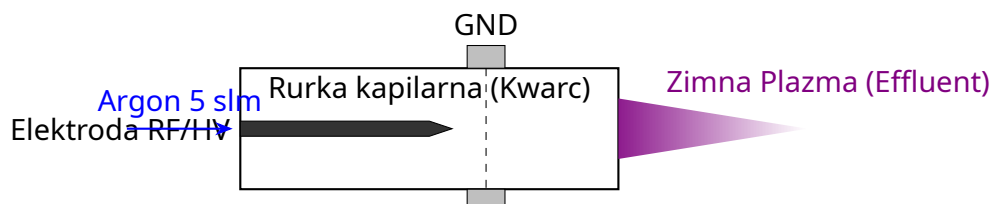
3.1 Szczegóły Konstrukcyjne

Dysze typu APPJ (Atmospheric Pressure Plasma Jet) generują "pióropusz" (effluent) zimnej plazmy.

- **Gazy robocze:** Gazy szlachetne (HeI, Argon) ze względu na łatwość jonizacji i niską temperaturę gazu ($T_{gas} < 40^{\circ}C$). Przepływ typowy: 2 – 10 slm (standardowe litry na minutę).
- **Topologia elektrod:** Często układ "igła-pierścień" lub dwie elektrody pierścieniowe na rurce kwarcowej.
- **Częstotliwość:** Często stosuje się pasmo radiowe (RF) 13.56 MHz, co pozwala na uzyskanie stabilnego wyładowania przy niższym napięciu zapłonu niż w przypadku niskich częstotliwości.

3.2 Przykłady Urządzeń Komercyjnych

1. **kINPen® MED (neoplas med GmbH):** Pierwsze na świecie urządzenie typu plasma jet dopuszczone jako wyrób medyczny klasy IIa. Stosowane do leczenia ran przewlekłych i chorób skóry. Pracuje na argonie.
2. **Piezobrush® PZ3 (Relyon Plasma / TDK):** Ręczne urządzenie typu "pen" wykorzystujące piezoelektryczny transformator (technologia CeraPlas™) do generowania plazmy z powietrza, bez zewnętrznego zasilania gazem.
3. **Adtec Steriplas:** Urządzenie medyczne do walki z infekcjami bakteryjnymi i biofilmami w ranach.



Rysunek 2: Schemat dyszy plazmowej w konfiguracji z elektrodą centralną.

4 Kacher Browina (Układ Rezonansowy)

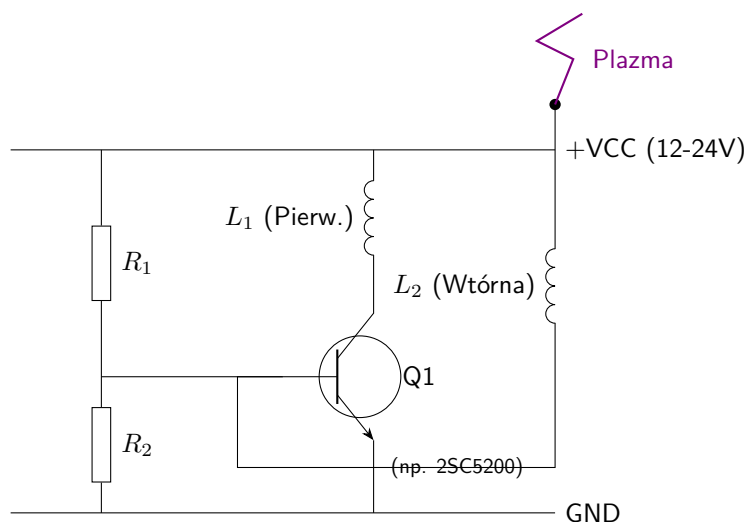
4.1 Zasada Działania i Specyfika

Kacher Browina (ros. *Качер Бровина*) to wariant generatora typu SSTC (Solid State Tesla Coil) pracujący w klasie E lub zbliżonej, charakteryzujący się silnym sprzężeniem zwrotnym z cewki wtórnej bezpośrednio do bazy tranzystora.

- **Autorezonans:** Układ samoczynnie dostraja się do częstotliwości rezonansowej cewki wtórnej (często pasmo MHz).
- **Wyładowanie:** Generuje tzw. "miotłkę" (brush discharge) o charakterze pojemnościowym. Plazma jest "zimna" w dotyku przy krótkim kontakcie dzięki efektowi naskórkowemu (prąd płynie po powierzchni skóry), jednak punktowo posiada wysoką temperaturę.
- **Zastosowanie:** Głównie edukacyjne, demonstracyjne (beziprzewodowy przesył energii) oraz w amatorskich badaniach nad polem elektromagnetycznym. Nie jest to urządzenie medyczne.

4.2 Schemat Ideowy (Wektorowy)

Poniższy schemat przedstawia klasyczną topologię Kachera na tranzystorze bipolarnym.



Rysunek 3: Kompletny schemat ideowy generatora Kacher Browina.

5 Bibliografia i Źródła

Literatura

- [1] K.D. Weltmann et al., *Atmospheric pressure plasma jet for medical therapy: plasma parameters and risk estimation*, Plasma Processes and Polymers, 2009.
- [2] M. Laroussi, *Low-temperature plasmas for medicine?*, IEEE Transactions on Plasma Science, 2009.
- [3] Dokumentacja techniczna urządzenia **kINPen® MED**, Producent: neoplas med GmbH, <https://neoplas-med.eu>

- [4] Opis technologii CeraPlas™ i urządzenia **Piezobrush® PZ3**, Producent: Relyon Plasma / TDK Electronics.
- [5] Materiały dotyczące generatora Browina (Kachera), Opis patentowy RU oraz publikacje techniczne Vladimira Ilicha Brovina.