

Газообразни диелектрици

Газообразните диелектрици трябва да бъдат химически инертни, при йонизация не трябва да образуват особено активни вещества, способни да разрушават твърдите тела или да причиняват корозия на металите.

Основните характеристики на газообразните диелектрици са електропроводимостта, пробив в еднородно електрично поле, пробив в нееднородно електрично поле.

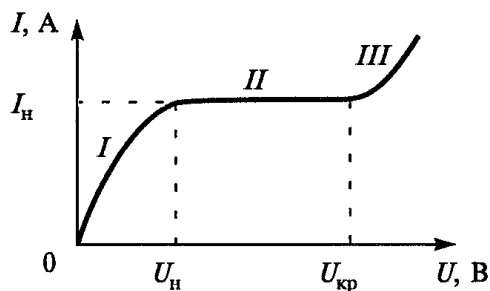
Електропроводимост на газове. Тя е свързана с наличието в газовете на йони и електрони, които се образуват под влиянието на външни въздействия или в резултат на удари на заредени частици с молекулите на газа. В съответствие с това в газовете възниква несамостоятелна или самостоятелна проводимост. При нормални условия броят на заредените частици (йони на газа или на твърди и течни примеси, които се намират в суспендирано състояние) в 1 m^3 атмосферен въздух не надвишава няколко десетки милиона ($< 10^7$).

Образуването на носителите на заряд е свързано с различни природни фактори: радиоактивно излъчване на Земята; излъчване на Слънцето; радиация, проникваща от космическото пространство; топлинно въздействие; рентгенови и гама-лъчи; поток неутрони и др.

Проводимостта на газа се повишава, ако се приложи нарастващо напрежение към електродите, между които той се намира.

Когато при поглъщане на енергия молекулата губи електрон, тя се превръща в положителен йон. Без електрично поле молекулите и йоните на газа извършват хаотични топлинни движения. При среща на положителни и отрицателни йони настъпва рекомбинация. Когато броят йони не се изменя с времето, между процесите на генерация и рекомбинация на заредени частици е настъпило термодинамично равновесие.

Изменението на електричния ток в газа, който се намира между електродите, е показано във волт-амперната характеристика, представена на фиг. 1.



Фиг. 1. Волт-амперна характеристика на газообразен диелектрик.

На участък I, който съответства на слабо електрическо поле, носителите на заряд се образуват под действието на приложеното към електродите напрежение (*несамостоятелна проводимост*). Протичащият при това ток I е пропорционален на напрежението U , т.е. изпълнява се законът на Ом:

$$I = U/R,$$

където R е електричното съпротивление на газа между електродите.

В този участък I заедно с генерацията на заредени частици става и тяхната рекомбинация.

В участък II с по-нататъшното увеличаване на напрежението скоростта на заредените частици нараства и те достигат до електрода без да рекомбинират. Пропорционалността между тока и напрежението се нарушава. Токът е достигнал стойност на насищане I_n при напрежението на насищане U_n . Този процес продължава и токът е постоянен I_n до достигане на критичното напрежение $U_{кр.}$.

В участък III при критичното напрежение $U_{кр.}$ енергията на заредените частици е достатъчна за осъществяване на *ударна йонизация*. Тогава броят на електроните и йоните рязко нараства, появява се *самостоятелна проводимост*, токът отново започва да се увеличава с нарастването на напрежението.

В резултат на ударната йонизация възниква електронна лавина, която движейки се към положителния електрод, среща лавинния поток на положителните йони, насочен към отрицателния електрод. В резултат на образуването се в газа проводяща газоразрядна плазма (смес от равен брой положителни йони и електрони, като почти всички молекули на газа са йонизирани) възниква пробив на газа.

Пробив на газа в еднородно електрично поле. Еднородно електрично поле се образува между електроди с еднаква геометрична форма с голяма повърхностна площ (напр. равнина – равнина, сфера – сфера), когато техният диаметър D е 10 пъти по-голям от разстоянието между тях h .

Диелектричната издръжливост на газовете в сравнение с твърдите и течни диелектрици не е голяма. Нарушението на техните изолационни свойства е свързано с явлението ударна йонизация.

Броят електрони, образували се в течение на 1 s в 1 cm^2 въздух под действие на радиоактивността на Земята или космическите лъчи, е от 10 до 20. Тези електрони са началният заряд, който може да доведе до пробив на газа в достатъчно силно електрично поле.

При увеличаване на напрежението на електричното поле, електроните се удрят помежду си и придобиват енергия, достатъчна за йонизация на молекулите на газа:

$$W = gU = gvE,$$

където g е зарядът на частицата, v е средната дължина на свободния пробег на електрона или йона, E е интензитетът на електричното поле.

За възникване на ударна йонизация е необходимо енергията на движещите се заряди да е по-голяма от енергията на йонизация $W_{\text{йон}}$:

$$gvE > W_{\text{йон}}.$$

Енергията на йонизация $W_{\text{йон}}$ на различни газове е от 4 eV до 25 eV.

Необходимият за йонизация критичен интензитет на електричното поле е:

$$E_{кр.} = W_{\text{йон}} / gv.$$

Началните заряди се удрят с атоми и молекули и създават нови електрони. Избитите при това „вторични“ електрони под действието на полето предизвикват йонизация на молекулите на газа. В резултат на този процес броят на електроните в газа нараства лавинообразно – много бързо се увеличава.

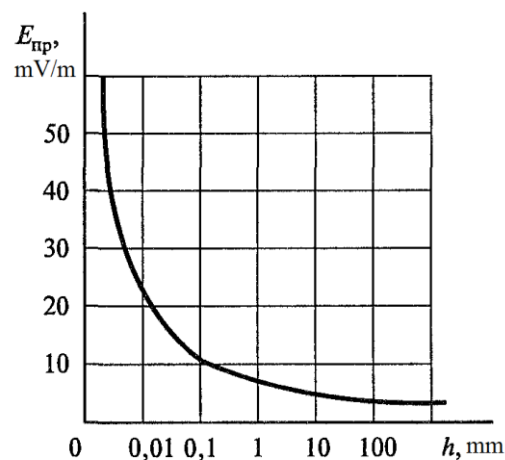
Ударната йонизация на електроните е в основата на газовия пробив. Обаче електронната лавина не е достатъчна за образуване на пробив, т.к. не създава проводящ път между

електродите.

Освен явлението ударна йонизация, създаващо първата лавина от заредени частици, при газовия пробив важна роля играят фотоните. Успоредно с ударната йонизация на газа става преход на електроните на по-високо енергетично ниво – създават се възбудени атоми и молекули. Тези електрони не губят връзката си с ядрото и без да се задържат на възбудените нива, се връщат на нормалните, излъчвайки енергия във вид на фотони. Тези молекули са повече от йонизираните. Те създават нови огнища на йонизация и образуват фотоелектронни лавини, което значително ускорява процесът на пробив на газа.

Газовият пробив протича мигновено. При разстояние между електродите $h = 1$ cm, времето за пробив е примерно 10^{-8} s.

Диелектричната издръжливост на газовете $E_{пр}$ зависи от еднородността на електричното поле, налягането на газа P , разстоянието между електродите h и честотата f .

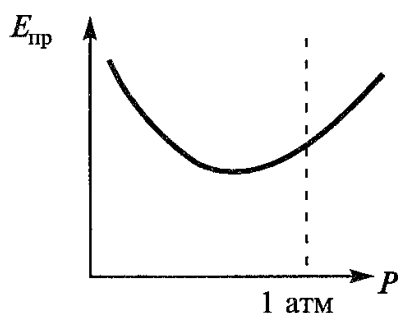


Фиг. 2. Зависимост на диелектричната издръжливост на газовете $E_{пр}$ във въздух при атмосферно налягане в еднородно електрично поле от разстоянието между електродите h .

Диелектричната издръжливост на газовете $E_{пр}$ се увеличава при намаляване на разстоянието между електродите при $h = 0,1$ mm и по-малко – фиг.2. Това е свързано с намаляване на вероятността за удари на електроните с газовите молекули в междуелектродното пространство и трудното формиране на разряд, т.к. свободните електрони и йони при такива малки разстояния не могат да получат енергия, достатъчна за ударна йонизация.

На зависимостта на диелектричната издръжливост от налягането на газа P - фиг.3., е основано използването на газовете като електрични изолатори във вакуумни кондензатори и кабели, запълнени с газ под налягане. Високата диелектрична издръжливост на вакуума широко се използва в техниката, например при конструирането на електровакуумни прибори.

При високо налягане на газа P – фиг. 3, увеличаването на диелектричната издръжливост на газовете $E_{пр}$ е свързано с намаляването на дължината на свободния пробег на електроните, а при малки налягания – с намаляването на вероятността за удари на електроните с газовите молекули.



Фиг.3. Зависимост на диелектричната издръжливост $E_{пр}$ от налягането на газа P .

Пробивното напрежение на газовете $U_{пр}$ в еднородно електрично поле зависи от произведението на разстоянието между електродите h и налягането на газа P . Тази зависимост е установена от немския физик Ф. Пашен и се нарича закон на Пашен.

Пробивът на газове при високи честоти ($f > 10^4$ Hz) е свързан с образуването на обемни заряди и със статични закъснение на амплитудата на напрежението.

Ако честотата на тока, при която става пробив на газа е под 10^4 Hz, то неговата диелектричната издръжливост $E_{пр}$ на постоянен и променлив ток е еднаква. При увеличаване на честотата на тока пробивното напрежение на газовете $U_{пр}$ намалява. Това се обяснява с факта, че малкоподвижните йони не успяват да участват в процеса на пробив.

Пробив на газа в нееднородно електрично поле. Нееднородно поле се образува между електродите, ако поне един от тях има малка площ. Основно нееднородни електрични полета се създават в газоразрядните прибори, между контактите на релета, между проводящите линии за електропренос.

Пробивът на газа в нееднородно електрично поле се отличава от този в еднородно поле по големината на пробивното напрежение $U_{пр}$ и по характера на развитие на самия процес на пробив. Пробивът на газа в нееднородно електрично поле става при по-ниски пробивни напрежения по сравнение с пробива в същия слой газ в еднородно поле.

Особеност на пробива на газа в нееднородно електрично поле е възникването на частичен разряд във вид на корона, който се съпровожда със светене и разрушение на молекулите. При по-нататъшното повишаване на напрежението на короната преминава в искров разряд. При голяма мощност на разряда се образува дъгов разряд, който се съпровожда с образуването на озон и азотни оксиди, характерни шипящи звуци и своеобразно светене.

Често възниква пробив на границата газ – твърд проводник, който се нарича повърхностен. На повърхностното пробивно напрежение в областите на ниските честоти силно влияние оказват влажността на въздуха, степента на запрашаване на изолатора и химичният състав на праха. Повърхностното пробивно напрежение може да се увеличи чрез увеличаване на пътя на повърхностния разряд. Затова повърхностите на изолаторите често се правят на ребра.

Особеност на газовия пробив е, че след изключването на приложеното към електродите напрежение, веднага се възстановява диелектричната издръжливост на газа.

Газообразните диелектрици при използването им като електроизолационни материали имат високо специфично съпротивление ρ , малка, близка към 1 диелектрична

проницаемост ϵ , малки диелектрични загуби - $\text{tg}\delta$.

Основен недостатък на газообразните диелектрици е ниската диелектричната издръжливост, но в много случаи тя няма значение.

В качеството на газообразните диелектрици се използват въздух, инертни и електроотрицателни газове.

Въздухът е смес от азот N_2 (78,03%), кислород O_2 (20,93%), въглероден диоксид CO_2 (0,03%), инертни газове He, Xe, Ar, Ne, Kr (0,1%).

Относителната плътност на въздуха е 1.

В много случаи въздухът е основен изолационен материал, например във въздушните кондензатори. На участъците на въздушните линии на далекопроводите, въздухът образува единствената изолация между голите проводници. Обаче често той се явява вспомогателен диелектрик, обкръжаващ детайлите и възлите.

Азот N_2 – Това е безцветен газ, без мирис. Той е безцветен в течно и в твърдо състояние. Има еднаква диелектрична проницаемост с въздуха, но е по-малко активен от въздуха, който съдържа кислород. Основните свойства на азота са:

Относителна молекулна маса	28,016
Плътност при температура:	
-196°C (течен азот)	0.80 g/cm ³
0°C	1.25 mg/cm ³
Температура на:	
топене	63,14 K (-210 °C)
кипене	77,35 K (-196 °C)

Молекулите на газообразния азот са двуатомни и не се разпадат на отделни атоми даже при високи температури. При атмосферно налягане молекулният азот ($^{14}\text{N}_2$) кондензира при температура 77 K (-195,79 °C) и замръзва при 63 K (-210,01 °C), образувайки кристална алотропна форма с хексагонална решетка, а под 35,4 K (-237,6 °C) азотът се трансформира в кубична алотропна форма. Течният азот, напомнящ външно водата, но с 80,8% от нейната плътност (плътността на течния азот при точката на кипене е 0,808 g/mL), е често използван криоген.

Молекулният азот е до голяма степен прозрачен за инфрачервената и видимата светлина. Значителна абсорбция се наблюдава при високочестотните ултравиолетови лъчи с дължина на вълната над 100 нанометра. Азотната абсорбция води до значително поглъщане на ултравиолетово излъчване в атмосферата на Земята. По същата причина молекулният азотен лазер излъчва в ултравиолетовия спектър.

Азотът е химически инертен, при стайна температура не реагира с металите, с изключение на лития. При нагряване се свързва с някои метали (магнезий, калций), а при много високи температури непосредствено с кислорода и водорода.

Азотът е технически газ, произвеждан чрез фракционна дестилация на втечен въздух или по механичен път от газообразен въздух. Съдържанието на чистия азот в газообразния продукт е от 99% до 99,9%, а в течния е 96%. Съдържанието на кислорода в газообразния азот е не повече от 1% , а в течния – 4%.

В чист вид азотът се използва сравнително рядко (за високоволтови кондензатори с постоянен капацитет, за напълване на балоните на осветителни лампи). В микроелектрониката азотът се използва като защитна среда, а течният – като уловители

във вакуумните системи за понижаване на налягането.

Газообразен кислород O_2 - Безцветен газ без мирис и вкус. Основните му свойства са:

Относителна молекулна маса	32
Плътност	1,42 g/cm ³
Температура на:	
топене	54,35 K (-218,4 °C)
кипене	90,18 K (-182,9 °C)
насищане на кислорода при нормално налягане	63 °C

Кислородът кондензира при 90,20 K (-182,95 °C) и замръзва при 54,36 K (-218,79 °C). Както течният, така и твърдият O_2 са прозрачни вещества с лек небесносин оттенък, дължащ се на абсорбирането на червеното. Течен кислород с висока чистота обикновено се получава чрез фракционна дестилация на втечен въздух. Той е силно реактивно вещество и трябва да се отделя от горими материали.

Кислородът в смес с хелий и азот (тримикс) се използва от водолазите за дишане под вода. Кислородни апарати се използват и от алпинистите при изкачване на високи върхове в планините. През 90-те стават популярни кислородните барове, където срещу заплащане може да се диша обогатен с кислород въздух. Първият такъв бар е открит в Лас Вегас.

Водород H_2 – Безцветен горящ газ, без мирис. Той е най-лекият газ – 1 литър водород има маса 0,09 g. Диелектричната издръжливост на водорода е 40% по-малка от тази на въздуха. Основните му свойства са:

Относителна молекулна маса	2,016
Плътност	0,018 g/cm ³
Температура на:	
топене	14,01 K (-259,14 °C)
кипене	20,28 K (-252,87 °C)

Ако към струята на водорода се поднесе запалена клечка кибрит, то водородът ще гори с несветещ пламък. При горене на смес от 2 обемни единици водород и една кислород, почти мигновено се съединяват газовете, което се съпровожда с взрив. Такава смес се нарича гърмящ газ. Температурата на водородния пламък е примерно 1000°C, а при въвеждането в него на кислород става 2500 – 3000 °C.

Водородът има много по-подходящи свойства за използването му като охлаждаща среда в сравнение с въздуха. Има висока топлопроводимост и топлоемност. Големите електрически машини се запълват с водород за намаляване на загубите на мощност при триенето на ротора с газа и забавяне на стареенето на органичните компоненти на изолацията. Водородът се използва като възстановителна среда при запояване и термична обработка.

Техническият водород в зависимост от марката се получава чрез електролиза на вода и хлорни соли или чрез парова конверсия на въглеродородните газове. Общото съдържание на примесите във вид на кислород O_2 , азот N_2 , въглероден диоксид CO_2 , въглероден оксид CO , метан е от 0,2% до 5%.

Смесите на техническия водород с хлор, кислород и въздух са взривоопасни. Долната граница за взривяване на сместта водород с въздух е 4 об.%, а горната - 75 об.%. Долната граница за взривяване на сместта водород с кислород е 4 об.%, а горната - 94 об.%.

Сместта водород – хлор в съотношение 1:1 се взривява на светлина. При работа с водород трябва да се вземат предпазни мерки.

Въглероден диоксид CO_2 газ – Въглеродният диоксид е безцветен газ без мирис и вкус. Плътноста му при 25 °C е 1,98 kg/m³, която е 1,65 пъти по-голяма от тази на въздуха. Молекулата на въглеродния диоксид (O=C=O) съдържа две двойни връзки и има линейна форма. Последната няма диполен момент. Тъй като е напълно окислена, не е много реактивоспособна и в частност е невъзпламенима.

При температури под –78 °C въглеродният диоксид променя агрегатното си състояние от газообразно в твърдо. Твърдият въглероден диоксид се нарича „сух лед“, процесът на получаване се нарича утаяване. При атмосферно налягане сухият лед преминава директно от твърдо в газообразно състояние при процес, наречен сублимация. Течен въглероден диоксид се получава само при налягане над 5,1 bar.

Хелий He – Инертен газ, който е най-лекият от всички инертни газове. Атомното ядро на ⁴He представлява α -частица, която се излъчва при радиоактивния разпад. Хелият е едноатомен инертен газ без цвят и мирис с температура на топене 0,95 K (–272,2 °C) и температура на кипене 4,22 K (–268,9 °C). Това е най-студената течност, която кипи в непосредствена близост до абсолютната нула. Плътноста му при –270°C е 0,147 g/cm³. Течният хелий е свръхпроводящ и притежава свойството свръхфлуидност.

Основните му свойства са:

Относителна молекулна маса	4,0026
Плътност	1,138 g/cm ³
Температура на:	
топене	0,95 K (–272,2 °C)
кипене	4,22 K (–268,9 °C).

Хелият не гори и не поддържа горене. При стайна температура обикновенното стъкло, желязо, паладий и платина са непроницаеми за хелия. Той прониква през кварцово стъкло, а при висока температура – през фосфор.

Хелият има уникални свойства: има най-ниската диелектрична издръжливост $E_{пр}$ – примерно 17 пъти по-ниска от въздуха, има най-ниската температура на втечняване от всички газове, диелектричестката проницаемост на течния хелий почти не се отличава от тази на газовете, коефициентите на термично разширение на газообразния и течния хелий са от един порядък.

Поради много ниската топлина на изпарение втечнения хелий се използва като нискотемпературна охлаждаща течност. При изпарението на течен хелий е получена най-ниската температура – няколко десети от градуса над абсолютната нула. В микроелектрониката течният хелий се използва като индикаторен газ при контрол за херметичност на микросхеми.

Аргон Ar_2 – безцветен инертен газ, почти 2 пъти по-тежък от въздуха. Основните му свойства са:

Относителна молекулна маса	39,94
Плътност	1,78 g/cm ³
Температура на:	
топене	83,80 K (–189,35 °C)
кипене	87,30 K (–185,85 °C)

Аргонът има съвкупност от благоприятни характеристики: относително нисък потенциал на йонизация, химическа инертност, невисока топлопроводност, много по-лесна технология за получаване и пречистване в сравнение с другите инертни газове.

Газът се използва в газоразрядните прибори и осветителни лампи, в микроелектрониката като защитен газ при микрозапояването и микрозаваряване, при монтаж и междуоперационно съхраняване на приборите в инертна среда, като газ-носител при производство на полупроводникови материали.

Съдържанието на аргон в атмосферата е 1%, което го прави най-често срещания благороден газ на Земята.

Някои газове, основно с голяма молекулна маса и плътност са електроотрицателни. Тези газове, съдържащи халогени (флуор, хлор и др.), за йонизацията на които се изисква голяма енергия, имат в сравнение с въздуха много по-висока диелектрична издръжливост. Към тях се отнасят серния хексафлуорид, перфлуорирани въглеродороди, т.е. въглеродороди, в молекулите на които всички атоми водород са заменени с атоми флуор.

Серен хексафлуорид (SF_6) – Има диелектрическа издръжливост около 25 пъти по-голяма от тази на въздуха. Гохберг е нарекъл този газ електрогаз от думите „електричество“ и „газ“.

Газът е нетоксичен, химически издръжлив, не се разлага при нагряване до 800 °С, може да бъде сгъстен при стайна температура без втечняване до налягане 2 МРа.

Един от недостатъците на газа е неговата висока цена. За поевтиняване често се използва негова смес с евтиния азот.

Използва се в газонапълнените високоволтови кондензатори, и като електроотрицателен газ при контрол на микросхеми за херметичност.

В микроелектрониката се използват различни газове и техните смеси, към чистотата на които има високи изисквания, т.к. наличието на примеси води до снижаване на електричните параметри на готовите продукти. Общото съдържание на примесите е от 0,5% до 1%. Основен примес в газовете, попаднал като газоотделяне от стените на апаратурата, са водните пари. В газовете се съдържа и CO_2 , Cl , F , SO_2 . За снижаване на замърсяването на газовете, тръбопроводите, вентилите и частите на установките се изготвят от високочисти вакуумни материали с ниско газоотделяне (нераждаема стомана, мед, алуминий, стъкло, флуоропласт и др).